



Universidad Carlos III de Madrid



Grado en Ingeniería eléctrica

Trabajo Fin de Grado:

DESARROLLO DE MODELOS DE REDES PARA ESTUDIOS DINÁMICOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS (MÁQUINAS SÍNCRONAS)

Autor:

Josué Esteban Espeja

Tutor:

José Luis Rodríguez Amenedo

Co-Director:

Miguel Eduardo Montilla D'Jesú



*PFC "Desarrollo de modelos de redes para estudios
dinámicos de sistemas eléctricos (máquinas síncronas)"*

*Josué Esteban Espeja
Departamento de Ingeniería Eléctrica*



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a Sara Moreno que es la persona más importante de mi vida, que me apoya día a día en todas y cada una de las inquietudes y proyectos nuevos que pasan por mi cabeza y que me ayuda a reflexionar en los momentos difíciles. Con ella he pasado los momentos más bonitos de mi vida y estoy convencido que, sin ella a mi lado, no hubiese sido posible sacar esto adelante .

En segundo lugar agradecer a mi tutor José Luis Rodríguez Amenedo por darme la oportunidad de realizar este proyecto y aportarme sus grandes conocimientos en las máquinas síncronas y a Miguel Eduardo Montilla D'Jesús por contribuir profundamente en este proyecto y ayudarme mucho en el trabajo que me ha supuesto el conocer Matlab.

También agradecer a mis compañeros de la universidad porque todos ellos me han aportado cosas muy buenas en estos cuatro años de carrera y me han ayudado a pasar algún que otro momento difícil.

Para terminar agradecer a mi familia, padres, hermanos, cuñadas, sobrinos, y demás familia por apoyarme en todo momento en este proyecto aunque sea desde lejos y regalarme una sonrisa cada vez que los veo.

En especial quiero agradecer y dedicar este proyecto a mi abuela y segunda madre Ernestina Gutiérrez, que me está viendo desde muy arriba pero fue la mujer que me crió, me regaló su enorme corazón y me enseñó a que todo en esta vida es posible con humildad y dedicación.

GRACIAS A TODOS.



RESUMEN

En este proyecto se pretende desarrollar una aplicación informática en entorno MATLAB para modelar las ecuaciones dinámicas que gobiernan a las máquinas síncronas, las cuales, en futuros estudios se podrán introducir en sistemas eléctricos con dispositivos de electrónica de potencia, FACTS, convertidores electrónicos de aeroturbinas de parques eólicos, plantas fotovoltaicas, etc.

Se ha comenzado el análisis del modelo a partir de las ecuaciones dinámicas de la máquina síncrona. Estas ecuaciones representan el funcionamiento general de las máquinas síncronas siendo un caso particular las ecuaciones en régimen permanente vista en el Grado de Ingeniería Eléctrica. Al estudiar la máquina síncrona se pretende emular las respuestas con la mayor exactitud posible. Sin embargo, al detallar demasiado el modelo, los cálculos en un ordenador serían muy lentos y los resultados con modelos más simples conservan la mayoría de información necesaria en el análisis de un sistema eléctrico. Es por ello que en este proyecto se comparará tres modelos: el modelo clásico (de 2º orden), un modelo de un eje (de 3er orden) y un modelo de dos ejes (de 4º orden) para encontrar los modelos apropiados según el estudio requerido y la respuesta a cortocircuitos trifásicos equilibrados. A su vez se compararan todos ellos con un modelo de 8º orden en el que se incluyen todas las dinámicas del sistema.

Los modelos se implementaron en el entorno de Matlab/Simulink a través de las interfaces amigables que tiene este software. En nuestros modelos realizaremos faltas trifásicas en bornes de la máquina para luego analizar la respuesta de la máquina y hacer las comparaciones entre los modelos.



ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1. Planteamiento	2
2. Objetivo general	3
2.1. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2: MODELO DE GENERADOR SÍNCRONO	4
1. Excitación externa del generador síncrono	6
2. Modelo reducido	14
3. Modelo sin considerar devanados de amortiguamiento	18
CAPÍTULO 3: ECUACIONES DINÁMICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA	22
1. Desarrollo de las ecuaciones para la máquina síncrona	23
1.1. Ecuaciones del circuito del estator (marco abc)	23
1.2. Ecuaciones del circuito del rotor (marco abc)	24
1.3. Transformación a un marco de referencia "dq"	24
1.4. Par electromagnético desarrollado por la máquina	26
2. Desarrollo de las ecuaciones para los modelos estudiados	26
3. Valores base de la máquina síncrona	30
3.1. Valores facilitados por la placa del generador	30
3.2. Valores en el estator de la máquina	31
3.3. Valores en el rotor de la máquina	31
4. Ecuaciones en p.u de la máquina síncrona	32
4.1. Ecuaciones de las tensiones del estator	32
4.2. Ecuaciones de las tensiones del rotor	33
4.3. Ecuaciones de los enlaces de flujo en el estator	33
4.4. Ecuaciones de los enlaces de flujo en el rotor	33



4.5. Ecuaciones del par y velocidad angular	34
CAPÍTULO 4: ESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	35
1. Estabilidad del ángulo del rotor	36
1.1. Relación Potencia-Ángulo	37
2. Estabilidad transitoria	39
3. Ejemplo de estabilidad estática	41
4. Métodos para aumentar la estabilidad de la máquina síncrona	43
CAPÍTULO 5: PRUEBAS DEL ESTUDIO REALIZADO	44
1. Modelo clásico (Orden 2)	46
2. Modelo de un eje (Orden 3)	54
3. Modelo de dos ejes (Orden 4)	64
4. Modelo completo (Orden 8)	75
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y FUTUROS ESTUDIOS	82
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO 1	85
ANEXO 2	89
ANEXO 3	92



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de una máquina síncrona trifásica de rotor devanado	7
Figura 2.2: Circuitos eléctricos de una máquina síncrona	8
Figura 2.3. Circuitos equivalentes completos d-q para el generador síncrono	13
Figura 2.4. Modelo subtransitorio del generador síncrono	17
Figura 2.5. Circuito equivalente del generador síncrono en notación compleja	18
Figura 2.6. Diagrama fasorial del generador síncrono	20
Figura 2.7. Modelo transitorio simplificado del generador síncrono	21
Figura 3.1: Dinámica delta y theta	27
Figura 3.2. Dinámica e_q'	28
Figura 3.3. Dinámica e_d'	29
Figura 3.4: Regulador de velocidad	29
Figura 4.1. Curva Potencia-Ángulo simple	38
Figura 4.2. Curva Potencia-Ángulo ejemplos	38
Figura 4.3. Curvas de oscilación de una máquina síncrona	40
Figura 4.4. Estabilidad estática de un generador síncrono en red infinita	41

MODELO DE ORDEN 2

Figura 5.1: Ángulo de desfase sin regulador	47
Figura 5.2: Intensidad del estator "abc" sin regulador	47
Figura 5.3: Par electromecánico sin regulador	48
Figura 5.4: Velocidad angular sin regulador	48
Figura 5.5: Ángulo de desfase con regulador	50
Figura 5.6: Intensidad del estator "abc" con regulador	50
Figura 5.7: Par electromecánico con regulador	51
Figura 5.8: Velocidad angular con regulador	51

MODELO DE ORDEN 3

Figura 5.10: Ángulo de desfase sin regulador	55
--	----



Figura 5.11: Intensidad del estator “abc” sin regulador	55
Figura 5.12: Par electromecánico sin regulador	56
Figura 5.13: Velocidad angular sin regulador	56
Figura 5.14: Intensidad del estator “d” sin regulador	57
Figura 5.15: Tensión del estator “q” sin regulador	57
Figura 5.16: Ángulo de desfase con regulador	59
Figura 5.17: Intensidad del estator “abc” con regulador	59
Figura 5.18: Par electromecánico con regulador	60
Figura 5.19: Velocidad angulas con regulador	60
Figura 5.20: Intensidad del estator “d” con regulador	61
Figura 5.21: Tensión del estator “q” con regulador	61

MODELO DE ORDEN 4

Figura 5.23: Ángulo de desfase sin regulador	65
Figura 5.24: Intensidad del estator “abc” sin regulador	66
Figura 5.25: Par electromecánico sin regulador	66
Figura 5.26: Velocidad angular sin regulador	67
Figura 5.27: Intensidad del estator “d” sin regulador	67
Figura 5.28: Tensión del estator “e” sin regulador	68
Figura 5.29: Ángulo de desfase con regulador	69
Figura 5.30: Intensidad del estator “abc” con regulador	70
Figura 5.31: Par electromecánico con regulador	70
Figura 5.32: Velocidad angular con regulador	71
Figura 5.33: Intensidad del estator “d” con regulador	71
Figura 5.34: Tensión del estator “d” con regulador	72
Figura 5.35: Ángulo de desfase	73

MODELO DE ORDEN 8

Figura 5.36: Ángulo de desfase sin regulador	76
Figura 5.37: Intensidad del estator “abc” sin regulador	76
Figura 5.38: Par electromecánico sin regulador	77
Figura 5.39: Velocidad angular sin regulador	77



GENÉRICAS

Figura 5.9: Ángulo delta modelo orden 2	52
Figura 5.22: Ángulo delta modelo orden 3	62
Figura 5.40: Ángulo delta	79
Figura 5.41: Par electromecánico	80
Figura 5.42: Flujo en el estator "d"	80
Figura 5.43: Flujo en el estator "q"	81



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Resultados modelo Orden 2 (corto 0.05sg.) sin regulador	46
Tabla 5.2: Resultados modelo Orden 2 (corto 0.05sg.) con regulador	49
Tabla 5.3: Resultados modelo Orden 2 (corto 0.37sg.) sin regulador	53
Tabla 5.4: Resultados modelo Orden 2 (corto 0.37sg.) con regulador	53
Tabla 5.5: Resultados modelo Orden 3 (corto 0.05sg.) sin regulador	54
Tabla 5.6: Resultados modelo Orden 3 (corto 0.05sg.) con regulador	58
Tabla 5.7: Resultados modelo Orden 3 (corto 0.32sg.) sin regulador	63
Tabla 5.8: Resultados modelo Orden 3 (corto 0.32sg.) con regulador	63
Tabla 5.9: Resultados modelo Orden 4 (corto 0.05sg.) sin regulador	65
Tabla 5.10: Resultados modelo Orden 4 (corto 0.05sg.) con regulador	69
Tabla 5.11: Resultados modelo Orden 4 (corto 0.31sg.) sin regulador	74
Tabla 5.12: Resultados modelo Orden 4 (corto 0.31sg.) con regulador	74
Tabla 5.13: Resultados modelo Orden 8 (corto 0.05sg.)	75
Tabla 5.14: Resultados modelo Orden 8 (corto 0.5sg.)	78



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



La energía eléctrica hoy en día es una energía indispensable en países desarrollados, utilizándose para toda clase de servicios, desde un punto de luz hasta la alimentación de motores en la industria. Se puede incluso afirmar que la energía eléctrica es indispensables en nuestras vidas.

La electricidad necesaria para abastecer este consumo se genera en centros de producción, los cuales se encargan de transformar una fuente primaria en energía eléctrica. Especificando se genera un sistema trifásico sinusoidal de tensiones con una frecuencia de 50 Hz. (en Europa) y amplitudes estandarizadas. Existen varios tipos de generación, las que se agrupan en hidráulicas, térmicas y nucleares. A partir de esta generación y para que la energía llegue a nuestras casas, pasa por una red de transporte para más tarde distribuirse a los hogares mediante la red de distribución.

Este proyecto se centra en la generación de esta energía, más específicamente en la máquina síncrona. Esta máquina es básicamente dos volúmenes cilíndricos ferromagnéticos, uno fijo y otro móvil, en los que se encuentran los devanados de la máquina constituidos por conductores eléctricos de la que se hablará profundamente más tarde.[10]

1. PLANTEAMIENTO

El presente proyecto surge por la necesidad de introducir unos modelos más sencillos del generador síncrono para el análisis en programas de estabilidad de sistemas eléctricos. A partir de esta necesidad se propone realizar un estudio de modelos de máquinas síncronas simplificadas y observar la diferencia entre ellas para obtener el mejor modelo en un análisis dinámico.

Esta herramienta permitirá, con el modelo elegido, realizar todo tipo de estudios dinámicos del generador síncrono. Será una herramienta fácil de utilizar y muy versátil, ya que se podrá introducir en el generador cualquier parámetro.



2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este proyecto es definir perfectamente la respuesta de una máquina síncrona ante cortocircuitos trifásicos. Con este estudio se pretende ver la diferencia entre todas las respuestas de cada uno de los modelos estudiados y encontrar el modelo más simple sin perder la información necesaria en el estudio transitorio de redes eléctricas.

2.1 Objetivos específicos

El primero de los objetivos es diseñar en el entorno de Matlab/Simulink cada uno de los modelos a estudiar, para ello se va a crear dos tipos de archivos; un archivo de datos en el que se definen los parámetros de la máquina síncrona a estudiar y otro archivo en el que se define el punto de operación de la máquina síncrona en régimen permanente.

El segundo objetivo es comprobar la estabilidad de la máquina cuando se produce un cortocircuito equilibrado trifásico en bornes de la máquina, sin ningún tipo de regulador de velocidad. Con este evento se pretende, a través de la simulación, encontrar el tiempo máximo de despeje de la falta trifásica para que el sistema sea estable. Una vez conseguido este tiempo para cada uno de los modelos, se complementará la máquina con un regulador de velocidad para aumentar la respuesta temporal de la máquina ante el cortocircuito buscando mejorar la estabilidad en una red eléctrica.



CAPÍTULO 2: MODELO DE **GENERADOR SÍNCRONO**



La máquina síncrona que opera como un generador es la principal fuente de generación eléctrica en el mundo. Las dos partes fundamentales del generador son el rotor (parte móvil de la máquina) y el estator (parte fija), las cuales tienen ranuras longitudinales en las que se insertan las bobinas. Estos devanados llevan la corriente suministrada a la carga eléctrica por el generador.

El devanado del rotor (devanado de campo) se alimenta con corriente continua (cc) suministrada por el excitador, que puede ser un generador o una fuente de cc separada y conectada a los devanados por medio de escobillas sobre anillos deslizantes. La fuerza magnetomotriz producida por este campo es muy alta y se combina con la del estator. El flujo resultante en el entrehierro genera voltajes en las bobinas de los devanados del estator y produce el par electromagnético entre el estator y el rotor.

El rotor es impulsado por una fuente de energía mecánica, generalmente una turbina. El par electromagnético cuando entrega potencia se opone al par de la fuente de energía, esta diferencia de pares produce unas pérdidas debido al núcleo de acero y a la fricción.

Los devanados de las máquinas síncronas polifásicas constituyen un grupo de circuitos relacionados entre sí mediante inductancias, algunos de los cuales se encuentran girando, por lo que las inductancias mutuas son variables.

Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas que giran a una velocidad vinculada a una frecuencia sometida por la red con la cual trabaja el generador. La frecuencia utilizada es de 50Hz en Europa y 60Hz en América.

El empleo de estos generadores son muy comunes en las centrales eléctricas, las cuales pueden ser de diferentes tipos, hidráulica, térmica, nuclear, etc. [9].

La estructura del rotor, suele ser de polos salientes (empleadas en centrales hidráulicas) para generadores acoplados a turbinas hidráulicas y presenta varias configuraciones. La primera de ellas corresponde a una estructura donde alrededor de los polos se arrollan bobinas inductoras devanadas con sentidos alternativos, de

forma, que conectadas todas en serie y recorridas por una corriente continua produzca una sucesión alternada de polos magnéticos según la velocidad de giro del rotor.

Para mejorar las características dinámicas de las máquinas síncronas de polos salientes se incorporan en el rotor devanados amortiguadores, son en esencia devanados en forma de jaula de ardilla que se alojan en ranuras situadas sobre las cabezas de los polos inductores. En régimen permanente no se induce f.e.m en estos conductores y por lo tanto la corriente en ellos es nula, cuando la velocidad de giro del generador no es igual a la velocidad del campo magnético aparece corriente en estos devanados cuyo efecto amortiguador consiste en sincronizar el rotor con el giro del campo magnético.

1. Excitación externa del generador síncrono

El modelo matemático del generador síncrono de excitación independiente se construye considerando que los devanados están dispuestos de tal forma que la distribución del campo magnético en el entrehierro es perfectamente sinusoidal, la dimensión radial del entrehierro es muy pequeña, los conductores son puntuales, es decir no se considera el efecto de las ranuras en el cálculo de las inductancias del rotor en función de la posición. El material magnético presenta reluctancia nula y se consideran despreciables los efectos de la saturación e histéresis. En la siguiente figura se muestra la disposición de los devanados en el estator y rotor. Se ha considerado devanados concentrados en el estator para facilitar su estudio. En la figura 2.1 se muestra un generador trifásico elemental. El devanado de campo, provocado por la intensidad que circula por la bobina, dan lugar a dos polos (norte y sur); el eje de estos polos se le llama eje directo (d), mientras la línea que discurre entre polos se le llama eje de cuadratura (q). [5]

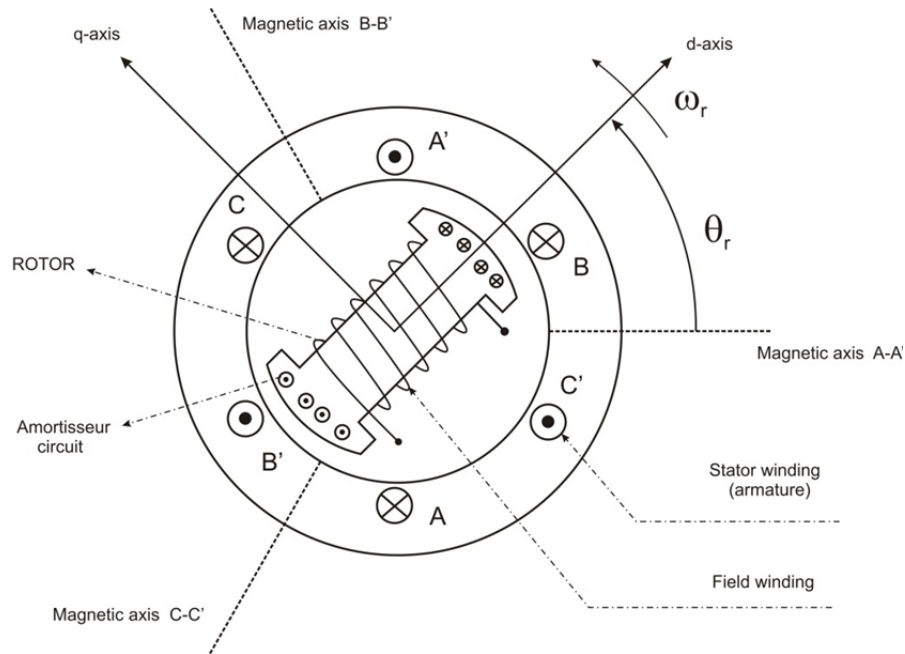


Figura 2.1. Diagrama de una máquina síncrona trifásica de rotor devanado

En la Figura 2.2 se muestran los circuitos eléctricos que se consideran en el análisis de la máquina síncrona. El circuito del estator consiste en un devanado trifásico por el que fluye corriente alterna. En el rotor se encuentran alojados el devanado de campo y los devanados amortiguadores. El devanado de campo está conectado a una fuente de excitación en continua. En el caso de los devanados amortiguadores, se supone que se pueden descomponer en dos circuitos, uno de eje directo (eje-d) y otro de cuadratura (eje-q). En la fase de diseño de máquinas se supone la existencia de un gran número de circuitos amortiguadores, en el caso de modelos matemáticos para estudios de estabilidad rara vez se consideran más de dos o tres circuitos amortiguadores [2].

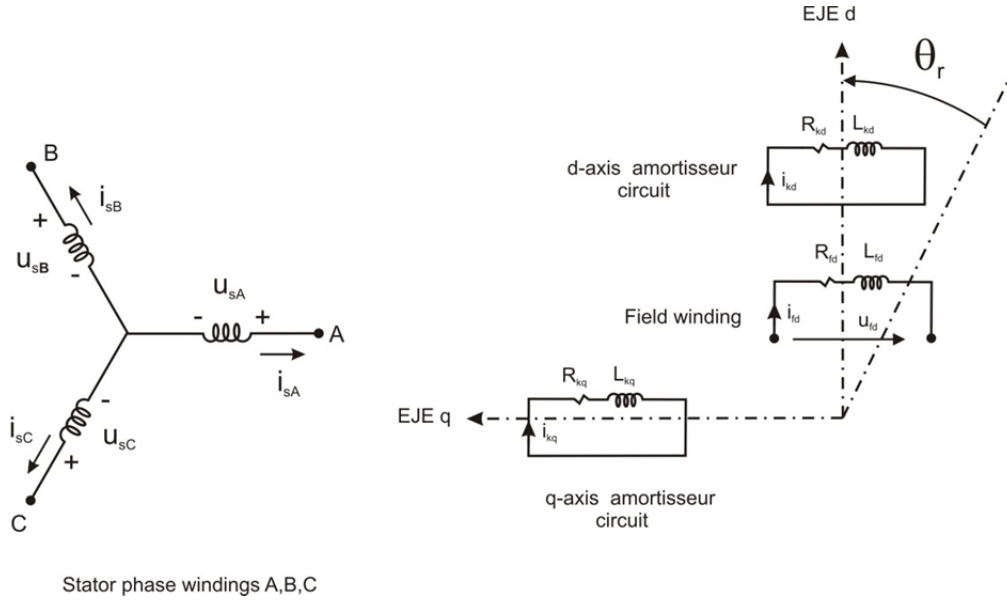


Figura 2.2: Circuitos eléctricos de una máquina síncrona

La nomenclatura que se empleará en la determinación del modelo matemático del generador asíncrono es la siguiente:

A,B,C: devanados por fase del estator

fd: devanado de campo

kd: circuito amortiguador eje directo

kq: circuito amortiguador eje cuadratura

k: 1...n; n número devandos amortiguadores

θ_r: ángulo girado por el rotor rad-elec. Ángulo que forma el eje magnético de la fase AA' del estator con el eje magnético del rotor (eje directo d).

ω_r: velocidad angular, rad-elect/s

Las corrientes del estator son negativas al contrario que en las máquinas asíncronas ya que el criterio que se ha tomado para este devanado es generador (la corriente sale por el terminal positivo), en el caso de las corriente del rotor se considerarán positivas cuando entran por el terminal positivo (criterio motor).

$$u_{sk}(t) = -R_s \cdot i_{sk}(t) + \frac{d\psi_{sk}(t)}{dt} \quad k = A, B, C \quad (2.1)$$

Los enlaces de flujo Ψ_{sk} se obtienen por la contribución conjunta de todas las corrientes existentes en la máquina. Debido al criterio de signos establecido, la contribución a los enlaces de flujo será para corrientes negativas del estator y positivas del rotor. En el caso de máquinas de polos salientes aparece una asimetría magnética en la máquina (es decir existen caminos de mayor y menor reluctancia al paso de las líneas de flujo) lo que implica que todas las inductancias (incluso las inductancias propias y mutuas del estator) dependen de la posición angular θ_r ,

$$\psi_{sk}(t) = - \sum_{l=A,B,C} L_{kl}(\theta_r) \cdot i_{sk}(t) + \sum_{m=fd,ld,lq} L_{km}(\theta_r) \cdot i_{rm}(t) \quad (2.2)$$

Como ya se ha comentado en el caso de las máquinas de polos salientes la permeabilidad del circuito magnético es mayor en el eje directo que en el eje en cuadratura, de ahí que las inductancias mutuas se definen para cada uno estos ejes. L_{md} para el eje directo y L_{mq} para el eje cuadratura.

La expresión general de la inductancia mutua entre los devanados del estator de la máquina responde a la siguiente ecuación general.

$$L_{xy} = \frac{L_{md} + L_{mq}}{2} \cdot \cos(\gamma_x - \gamma_y) + \frac{L_{md} - L_{mq}}{2} \cdot \cos(2\theta_r - (\gamma_x + \gamma_y)) \quad (2.3)$$

γ_x y γ_y son las coordenadas angulares de los devanados x e y respectivamente.

Las inductancias mutuas entre el estator y el rotor dependen de la posición relativa de unas bobinas respecto a otras, pero no a la variación de permeabilidad del circuito magnético con la posición. Cuando las bobinas del estator están en línea con las del rotor, el flujo común que los concatena es máximo y por lo tanto su inductancia. Así las expresiones de las inductancias mutuas entre la fase sA del estator y del rotor son las siguientes:

$$\begin{aligned} L_{sAfd} &= L_{md} \cdot \cos \theta_r \\ L_{sAld} &= L_{md} \cdot \cos \theta_r \\ L_{sAlq} &= L_{mq} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{\pi}{2}\right) = -L_{mq} \cdot \sin \theta_r \end{aligned} \quad (2.4)$$

En el caso de las fases sB y sC se sustituirá el ángulo θ_r por $\theta_r - 2\pi/3$ y $\theta_r + 2\pi/3$ respectivamente.

Tomando las expresiones de flujo del estator en cada fase y aplicando la definición de fasor se obtiene el fasor de flujo del estator en un sistema de referencia estacionario. Si este fasor se refiere a un sistema de referencia d-q, se obtendrán las siguientes expresiones:

$$\underline{\Psi}_s^r = \underline{\Psi}_s^{AB} \cdot e^{-j\theta_r(t)} = \Psi_d + j \cdot \Psi_q \quad (2.5)$$

Nótese que ahora el sistema de referencia d-q está ligado al rotor de ahí que el fasor de flujo del estator se indique con superíndice r. La relación entre los flujos y las intensidades en la máquina queda expresada de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd}^r \\ \Psi_{sq}^r \\ \Psi_{fd}^r \\ \Psi_{1d}^r \\ \Psi_{1q}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & L_{mq} \\ -L'_{md} & 0 & L_{fd} & L_{md} & 0 \\ -L'_{md} & 0 & L_{md} & L_{1d} & 0 \\ 0 & -L'_{mq} & 0 & 0 & L_{1q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd}^r \\ i_{sq}^r \\ i_{fd}^r \\ i_{1d}^r \\ i_{1q}^r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

donde:

$L_{\sigma s}$ es la inductancia de dispersión del estator

L_{md} es la inductancia mutua de eje directo. $L'_{md} = 3/2 L_{md}$

L_{mq} es la inductancia mutua de eje cuadratura $L'_{mq} = 3/2 L_{mq}$

L_d es la inductancia síncrona de eje d $L_d = L_{md} + L_{\sigma s}$

L_q es la inductancia síncrona de eje q $L_q = L_{mq} + L_{\sigma s}$

$L_{\sigma fd}$ es la inductancia de dispersión del devanado de excitación

$L_{\sigma 1d}$ es la inductancia de dispersión del devanado amortiguador de eje directo

$L_{\sigma 1q}$ es la inductancia de dispersión del devanado amortiguador de eje cuadratura

L_{fd} es la inductancia propia del devanado de excitación $L_{fd} = L_{md} + L_{\sigma fd}$

L_{1d} es la inductancia propia del devanado de excitación de eje directo $L_{1d} = L_{md} + L_{\sigma 1d}$

L_{1q} es la inductancia propia del devanado de excitación de eje cuadratura

$$L_{1q} = L_{mq} + L_{\sigma 1q}$$

En estas ecuaciones se han considerado que todas las magnitudes del rotor están referidas al estator, de ahí que se utilice la notación con prima.

Las ecuaciones eléctricas del estator se deducen de la misma forma que para el caso de máquinas asíncronas

$$\underline{u}_s^r = -r_s \cdot \underline{i}_s^r + \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\underline{\psi}_s^r}{dt} + j \cdot \overline{\omega}_r \cdot \underline{\psi}_s^r \quad (2.7)$$

Tomando parte real e imaginaria se obtiene:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= -r_s \cdot i_{sd} + \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \overline{\omega}_r \cdot \psi_{sq} \\ u_{sq} &= -r_s \cdot i_{sq} + \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \overline{\omega}_r \cdot \psi_{sd} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Operando de igual forma para el circuito eléctrico del rotor se obtienen las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} u'_{fd} &= r_{fd} \cdot i'_{fd} + \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{fd}}{dt} \\ 0 &= r_{1d} \cdot i'_{1d} + \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{1d}}{dt} \\ 0 &= r_{1q} \cdot i'_{1q} + \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{1q}}{dt} \end{aligned} \quad (2.9)$$

El modelo completo del generador síncrono tomando como variables de estado el vector de corrientes [i] y como entradas el vector de tensiones [u] se obtiene despejando las relaciones entre flujos y corrientes e introduciéndolas en las expresiones (2.8) y (2.9).

$$[i] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i'_{fd} \\ i'_{1d} \\ i'_{1q} \end{bmatrix} \quad [u] = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u'_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Haciendo uso del operador derivada ecuación (2.9) se obtiene :

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u'_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_s + \bar{p} \cdot l_d) & \bar{\omega}_r \cdot l_q & \bar{p} \cdot l_{md} & \bar{p} \cdot l_{md} & -\bar{\omega}_r \cdot l_{mq} \\ -\bar{\omega}_r \cdot l_d & -(r_s + \bar{p} \cdot l_q) & \bar{\omega}_r \cdot l_{md} & \bar{\omega}_r \cdot l_{md} & \bar{p} \cdot l_{mq} \\ -\bar{p} \cdot l'_{md} & 0 & r_{fd} + \bar{p} \cdot l_{fd} & \bar{p} \cdot l_{md} & 0 \\ -\bar{p} \cdot l'_{md} & 0 & \bar{p} \cdot l_{md} & r_{1d} + \bar{p} \cdot l_{1d} & 0 \\ 0 & -\bar{p} \cdot l'_{mq} & 0 & 0 & r_{1q} + \bar{p} \cdot l_{1q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i'_{fd} \\ i'_{1d} \\ i'_{1q} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Estas ecuaciones se han plantado en valores normalizados. Si se despejan las derivadas de las variables de estado el sistema dinámico del generador síncrono en forma matricial queda formulado de la siguiente forma

$$\bar{p} \cdot [i] = [L]^{-1} \cdot \{[u] - ([R] + \bar{\omega}_r \cdot [G]) \cdot [i]\} \quad (2.12)$$

donde la matriz de inductancias [L] es la que relaciona los enlaces de flujo con las corrientes en la ecuación (2.6)

$$[L] = \begin{bmatrix} -l_d & 0 & l_{md} & l_{md} & 0 \\ 0 & -l_q & 0 & 0 & l_{mq} \\ -l'_{md} & 0 & l_{fd} & l_{md} & 0 \\ -l'_{md} & 0 & l_{md} & l_{1d} & 0 \\ 0 & -l'_{mq} & 0 & 0 & l_{1q} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

y las matrices [R] y [G] toman la siguiente forma

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{1q} \end{bmatrix} \quad [G] = \begin{bmatrix} 0 & l_q & 0 & 0 & -l_{mq} \\ -l_d & 0 & l_{md} & l_{md} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

El circuito equivalente para la componente d y q se representa en la Figura 2.3.

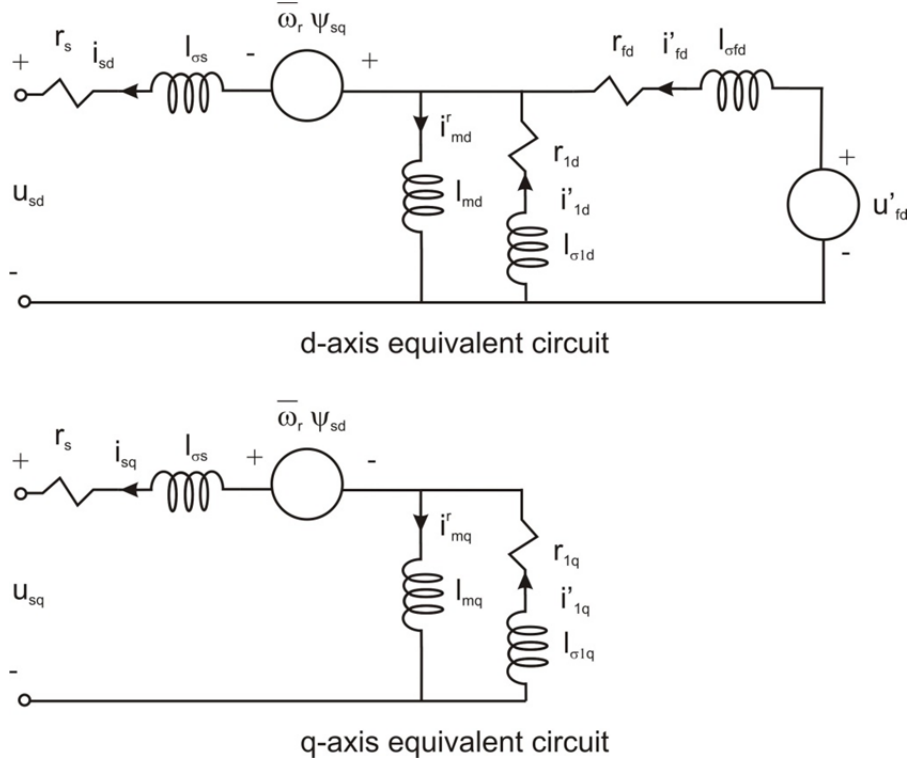


Figura 2.3. Circuitos equivalentes completos d-q para el generador síncrono

Para completar el conjunto de ecuaciones dinámicas a continuación se calcula el par electromagnético en función de las intensidades del estator y del rotor. Aplicando la definición del par electromagnético y sustituyendo los flujos Ψ_{sd} y Ψ_{sq} en función de las intensidades se obtiene:

$$\begin{aligned}
 t_g &= -\text{Im}\{(\underline{\psi}_s^r)^* \cdot \underline{i}_s^r\} = (\psi_{sq} \cdot i_{sd} - \psi_{sd} \cdot i_{sq}) = \\
 &= (-l_q \cdot i_{sq} + l_{mq} \cdot i_{1q}) \cdot i_{sd} - (-l_d \cdot i_{sd} + l_{md} \cdot i_{fd} + l_{md} \cdot i_{1d}) \cdot i_{sq} = \\
 &= l_{md} \cdot i_{fd} \cdot i_{sq} + (l_d - l_q) \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} + l_{md} \cdot i_{sd} \cdot i_{1q} - l_{mq} \cdot i_{sq} \cdot i_{1d} \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

El primer término de la ecuación del par corresponde al par de sincronismo y se debe a la interacción de la intensidad de campo (eje directo) y la componente en cuadratura de la intensidad del estator. El segundo sumando se denomina par de reluctancia y está producido por la asimetría magnética existente en el circuito magnético de la máquina, a este par sólo contribuyen las componentes de la corriente del estator. En el

caso de una máquina de rotor cilíndrico este término es nulo. Finalmente el par correspondiente a los devanados amortiguadores se expresa en los dos últimos términos de la ecuación (2.15), en ellos se muestra el acoplamiento que se produce entre las corrientes de los devanados amortiguadores y la corriente del estator.

Se puede comprobar la misma expresión anterior (2.15) utilizando únicamente la matriz $[G]$ y el vector de corrientes $[i]$ según la siguiente ecuación

$$t_g = [i]^T \cdot [G] \cdot [i] \quad (2.16)$$

2. Modelo reducido

En este apartado se representan algunas alternativas del modelo dinámico del generador síncrono utilizando estudios de estabilidad. Para poder simplificar los modelos hay que realizar diferentes consideraciones que se tendrán en cuenta en los cálculos y en los modelos a realizar. Algunas de ellas son:

Variaciones de flujo del estator despreciables. Las variaciones de flujo del estator decaen rápidamente y no se suelen considerar en los estudios de estabilidad. Esta simplificación permite que el modelo sea compatible con los modelos de líneas de transmisión y en general con los modelos de red que se suelen plantear en términos de ecuaciones algebraicas.

Variaciones pequeñas de velocidad de giro del rotor. Otra simplificación bastante habitual en los modelos de generadores síncronos convencionales es considerar que la velocidad de giro del rotor toma un valor igual a 1 p.u en las ecuaciones eléctricas del estator. Esto no quiere decir que la velocidad de giro sea constante, sino que sus variaciones son pequeñas y no influyen significativamente en la tensión del estator.

En este apartado no se consideran las variaciones de flujo del estator y se mantiene toda la dinámica de los circuitos eléctricos del rotor. De esta forma las ecuaciones diferenciales de este sistema simplificado serán sólo las de los circuitos del rotor y se expresan como

$$\begin{aligned}\frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{fd}}{dt} &= u'_{fd} - r_{fd} \cdot i'_{fd} \\ \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{1d}}{dt} &= -r_{1d} \cdot i'_{1d} \\ \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{1q}}{dt} &= -r_{1q} \cdot i'_{1q}\end{aligned}\quad (2.17)$$

Al prescindir de las variaciones de flujo del estator las ecuaciones eléctricas del estator quedan expresadas como

$$\begin{aligned}u_{sd} &= -r_s \cdot i_{sd} - \overline{\omega_r} \cdot \psi_{sq} \\ u_{sq} &= -r_s \cdot i_{sq} + \overline{\omega_r} \cdot \psi_{sd}\end{aligned}\quad (2.18)$$

Tomando las intensidades del rotor en función de los flujos

$$\begin{aligned}i'_{fd} &= \frac{\psi_{fd} - \psi_{md}}{l_{\sigma fd}} \\ i'_{1d} &= \frac{\psi_{1d} - \psi_{md}}{l_{\sigma 1d}} \\ i'_{1q} &= \frac{\psi_{1q} - \psi_{mq}}{l_{\sigma 1q}}\end{aligned}\quad (2.19)$$

y sustituyendo las corrientes del rotor de eje directo en la expresión de ψ_{md} , se obtiene

$$\begin{aligned}\psi_{md} &= l_{md} \cdot (-i_{sd} + i'_{fd} + i'_{1d}) = \\ &= -l_{md}'' \cdot i_{sd} + l_{md}'' \cdot \left(\frac{\psi_{fd}}{l_{\sigma fd}} + \frac{\psi_{1d}}{l_{\sigma 1d}} \right)\end{aligned}\quad (2.20)$$

Si se define el flujo subtransitorio de eje directo como

$$\psi_{md}'' = l_{md}'' \cdot \left(\frac{\psi_{fd}}{l_{\sigma fd}} + \frac{\psi_{1d}}{l_{\sigma 1d}} \right)\quad (2.21)$$

éste se podrá expresar en función del flujo común de eje directo, la corriente del estator i_{sd} y la inductancia subtransitoria de eje directo l_{md}'' como

$$\psi_{md}'' = \psi_{md} + l_{md}'' \cdot i_{sd}\quad (2.22)$$

donde

$$l_{md}'' = \left(\frac{1}{l_{md}} + \frac{1}{l_{\sigma fd}} + \frac{1}{l_{\sigma 1d}} \right)^{-1} = l_d'' - l_{\sigma s} \quad (2.23)$$

Realizando la misma operación para el flujo Ψ_{mq}

$$\begin{aligned} \Psi_{mq} &= l_{mq} \cdot (-i_{sq} + i'_{1q}) = \\ &= -l_{mq} \cdot i_{sq} + l_{mq} \cdot \frac{\Psi_{1q}}{l_{\sigma 1q}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

el flujo subtransitorio de eje en cuadratura, Ψ''_{mq} se define como

$$\Psi''_{mq} = l_{mq}'' \cdot \frac{\Psi_{1q}}{l_{\sigma 1q}} = \Psi_{mq} + l_{mq}'' \cdot i_{sq} \quad (2.25)$$

y la inductancia subtransitoria de eje cuadratura l''_q

$$l_{mq}'' = \left(\frac{1}{l_{mq}} + \frac{1}{l_{\sigma 1q}} \right)^{-1} = l_q'' - l_{\sigma s} \quad (2.26)$$

Asimismo, se definen las tensiones subtransitorias e''_d y e''_q como

$$\begin{aligned} e_d'' &= -\overline{\omega_r} \cdot \Psi''_{mq} \\ e_q'' &= +\overline{\omega_r} \cdot \Psi''_{md} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Las ecuaciones eléctricas del estator, considerando los parámetros subtransitorios, y suponiendo constantes los enlaces de flujo transitorio y por lo tanto las tensiones transitorias e''_d y e''_q , quedan como

$$\begin{aligned} u_{sd} &= -r_s \cdot i_{sd} + \overline{\omega_r} \cdot l_q'' \cdot i_{sq} - \frac{l_d''}{\omega_l} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + e_d'' \\ u_{sq} &= -r_s \cdot i_{sq} - \overline{\omega_r} \cdot l_d'' \cdot i_{sd} - \frac{l_q''}{\omega_l} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + e_q'' \end{aligned} \quad (2.28)$$

Estas ecuaciones son las adecuadas si se consideran los flujos del rotor como variables de estado. Las ecuaciones diferenciales que definen la dinámica de estas variables son las siguientes

$$\begin{aligned}\frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{fd}}{dt} &= u'_{fd} - r_{fd} \cdot \left(\frac{\psi_{fd} - \psi_{md}}{l_{\sigma fd}} \right) \\ \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{ld}}{dt} &= -r_{ld} \cdot \left(\frac{\psi_{ld} - \psi_{md}}{l_{\sigma ld}} \right) \\ \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{d\psi_{lq}}{dt} &= -r_{lq} \cdot \left(\frac{\psi_{lq} - \psi_{mq}}{l_{\sigma lq}} \right)\end{aligned}\quad (2.29)$$

donde Ψ_{md} y Ψ_{mq} se pueden poner en función de las variables de estado. En la Figura 2.4 se muestra el circuito equivalente del modelo subtransitorio

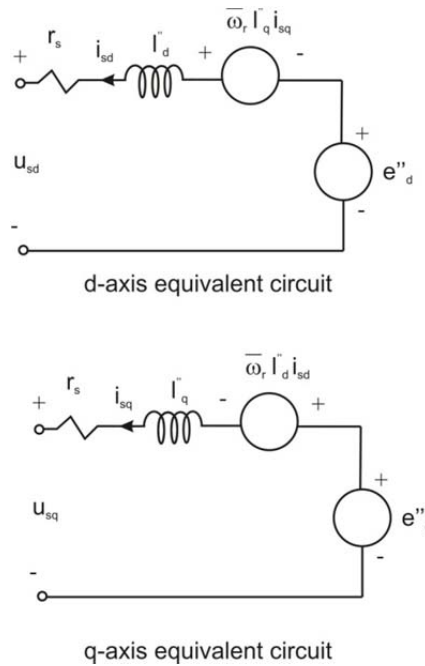


Figura 2.4. Modelo subtransitorio del generador síncrono

En el caso de que las inductancias subtransitorias sean iguales, es decir $l''_d = l''_q$ las ecuaciones eléctricas del estator en notación compleja quedan expresadas como

$$\underline{e}'' = \underline{u}_s + (r_s + j \cdot \overline{\omega_r} \cdot l'') \cdot \underline{i}_s + \frac{l''}{\omega_1} \cdot \frac{d\underline{i}_s^r}{dt} \quad (2.30)$$

donde

$$\underline{e}'' = e_d'' + j \cdot e_q'' \quad (2.31)$$

El circuito equivalente se muestra en la Figura 2.5. Este circuito se utiliza para calcular las condiciones iniciales de la componente fundamental de las corrientes de cortocircuito considerando constantes los flujos de estator y rotor, en este caso la ecuación eléctrica del estator se expresa de forma algebraica. Ya que los enlaces de flujo del rotor no cambian instantáneamente, el valor de e' es igual a su valor previo a la falta.

Sin embargo en los programas de estabilidad no es adecuado considerar que los flujos del rotor no varían, de ahí que la hipótesis planteada no es razonable cuando se simulan tiempos superiores a las constantes de tiempo subtransitorias, en estos casos es válido considerar que las fuerzas electromotrices e_d'' y e_q'' tienen dinámica.

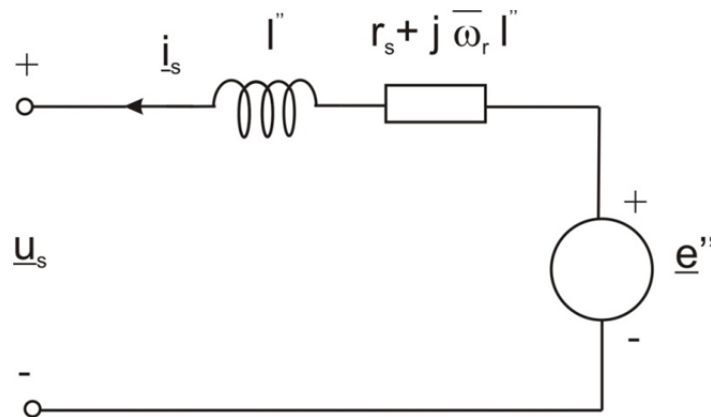


Figura 2.5. Circuito equivalente del generador síncrono en notación compleja

3. Modelo sin considerar devanados de amortiguamiento

En este tipo de modelos no se considera el efecto de los devanados amortiguadores. Los parámetros correspondientes a los devanados amortiguadores se relacionan con las constantes de tiempo conocidas como subtransitorias, por lo que su influencia está asociada a fenómenos de muy corta duración. Si en los estudios de simulación no se requiere analizar este tipo de perturbaciones se puede emplear un modelo más sencillo en el que no se contemplen dichos devanados amortiguadores. Esta es una aproximación bastante habitual en los estudios de estabilidad.

Considerando estas simplificaciones los enlaces de flujo se pueden expresar como

$$\begin{aligned}\psi_{sd} &= -l_d \cdot i_{sd} + l_{md} \cdot i'_{fd} \\ \psi_{sq} &= -l_q \cdot i_{sq} \\ \psi'_{fd} &= -l_{md} \cdot i_{sd} + l_{fd} \cdot i'_{fd}\end{aligned}\quad (2.32)$$

La única ecuación dinámica del generador es la que está asociada a la tensión del rotor

$$\overline{p} \cdot \psi_{fd} = u'_{fd} - r_{fd} \cdot i'_{fd} \quad (2.33)$$

En la literatura técnica las ecuaciones anteriores se expresan en función de las siguientes variables

$$\begin{aligned}e_I &= l_{md} \cdot i'_{fd} \\ e'_q &= \frac{l_{md}}{l_{fd}} \cdot \psi_{fd} \\ e_{fd} &= \frac{l_{md}}{r_{fd}} \cdot u'_{fd}\end{aligned}\quad (2.34)$$

Empleando las nuevas variables la ecuación de la componente directa del flujo del estator queda como

$$\psi_{sd} = -l_d \cdot i_{sd} + e_I \quad (2.35)$$

Multiplicando la expresión del flujo del devanado de excitación por l_{md}/l_{fd} y usando las nuevas variables se obtiene

$$e'_q = -\frac{l_{md}^2}{l_{fd}} \cdot i_{sd} + e_I \quad (2.36)$$

El factor que multiplica a i_{sd} se puede expresar en función de la inductancia transitoria l'_d y la inductancia l_d como

$$l_d - l'_d = \frac{l_{md}^2}{l_{fd}} \quad (2.37)$$

La inductancia L'_d se define de igual forma que la inductancia subtransitoria pero sin considerar los devanados amortiguadores

$$l_d' = (\frac{1}{l_{md}} + \frac{1}{l_{\sigma'd}})^{-1} + l_{\sigma s} \quad (2.38)$$

Así pues la ecuación 1.3.5 queda expresada como

$$e'_q = e_I - (l_d - l'_d) \cdot i_{sd} \quad (2.39)$$

Si se multiplica la ecuación dinámica por I_{md}/I_{fd} se obtiene

$$\bar{p} \cdot e'_q = \frac{1}{\tau'_{d0}} (e_{fd} - e_l) \quad (2.40)$$

donde τ'_{d0} es la constante de tiempo transitoria de circuito abierto expresada en p.u

$$\tau'_{d0} = T'_{d0} \cdot \omega_1 = \frac{l_{fd}}{r_{fd}} \quad (2.41)$$

Esta formulación se puede considerar como el modelo clásico de generador síncrono que se ha venido utilizando desde hace años en programas de estabilidad.

En la Figura 2.6 se puede observar el diagrama vectorial de las tensiones y corrientes de un generador síncrono de polos salientes. Nótese como la f.e.m está orientada con el eje q, de ahí su denominación e_q . De igual forma la variable de estado e'_q se obtiene mediante la proyección de la f.e.m e' sobre el eje q. En la figura 2.6 se muestra el ángulo de carga δ que forman el vector de tensión del estator y la f.e.m e_q .

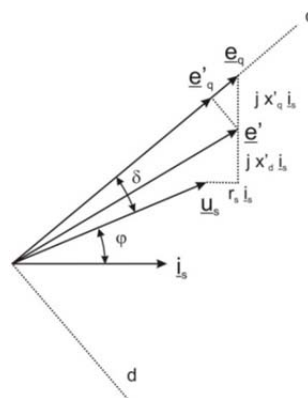


Figura 2.6. Diagrama fasorial del generador síncrono

En estudios en los que el periodo de análisis es más pequeño que la constante de tiempo transitoria a circuito abierto $T'd_0$ el modelo del generador síncrono se simplifica considerando e'_q constante durante el periodo de estudio. Esta hipótesis elimina la única ecuación diferencial que define la dinámica del generador síncrono. Si además se considera que las reactancias de eje directo y cuadratura son iguales aun cuando la configuración de la máquina sea de polos salientes ($x'_d=x'_q$) la fuerza electromotriz detrás de la reactancia $r_s+jx'_d$ permanece constante, obteniendo así el circuito equivalente simplificado correspondiente al modelo transitorio del generador síncrono de la Figura 2.7.

Así la ecuación eléctrica del estator queda expresada como

$$\underline{e}' = \underline{u}_s + (r_s + j \cdot x'_d) \cdot \underline{i}_s \quad (2.42)$$

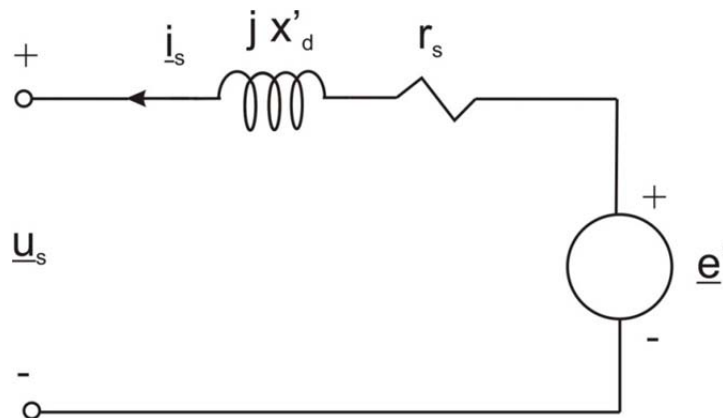


Figura 2.7. Modelo transitorio simplificado del generador síncrono



CAPÍTULO 3: ECUACIONES

DINÁMICAS DE LA MÁQUINA

SÍNCRONA ADAPTADAS A

EL MODELO ESTUDIADO

En este capítulo se habla de las ecuaciones dinámicas del generador síncrono así como de las ecuaciones específicas que se necesitan en los modelos estudiados en este proyecto. También se observan los modelos dinámicos realizados en Matlab/Simulink de los modelos.

Las ecuaciones generales de la máquina síncrona se vieron en la referencia [1] de la bibliografía, siendo esta uno de los libros más importantes utilizados en el proyecto.

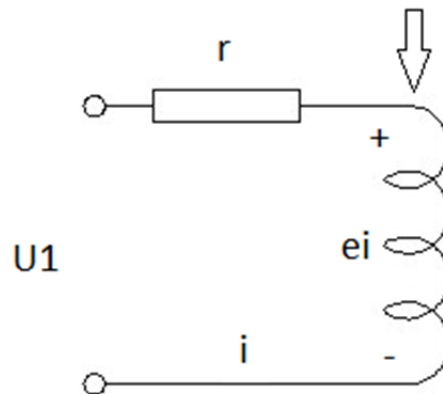
1. Desarrollo de las ecuaciones para la máquina síncrona

$$u_1 = \frac{d\Psi}{dt} + r * i$$

$$-e_i + i * r + u_1 = e$$

$$u_1 = e_i - i * r$$

$$u_1 = \frac{d\Psi}{dt} - r * i \quad (3.1)$$



El signo de la ecuación dependerá del sentido de la intensidad de la corriente.

1.1 Ecuaciones del circuito del estator (marco abc)

$$u_a(t) = \frac{d\Psi_a(t)}{dt} - r_s * i_a(t)$$

$$u_b(t) = \frac{d\Psi_b(t)}{dt} - r_s * i_b(t)$$

$$u_c(t) = \frac{d\Psi_c(t)}{dt} - r_s * i_c(t) \quad (3.2)$$

Donde:

r_s = Resistencia en el estator (inducido).

u = Tensiones instantánea fase-tierra en el estator.

1.2 Ecuaciones del circuito del rotor (marco abc)

$$\begin{aligned}
 u_{fd}(t) &= \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_{fd}(t)}{dt} + r_{fd} * i_{fd}(t) \\
 0 &= \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_{kd}(t)}{dt} + r_{kd} * i_{kd}(t) \\
 0 &= \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_{kq}(t)}{dt} + r_{kq} * i_{kq}(t)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Donde:

u_{fd} = Tensión del devanado del campo del inductor.

i_{fd} = Corriente del campo.

r_{fd} = Resistencia en el devanado del campo.

i_{kd} y i_{kq} = Corriente de los devanados de amortiguamiento.

r_{kd} y r_{kq} = Resistencias en los devanados de amortiguamiento.

El modelo completo del generador síncrono tomando como variables de estado el vector de corrientes [i] y como entradas el vector de tensiones [u] se obtiene despejando las relaciones entre flujos y corrientes e introduciéndolas en las expresiones anteriores.

$$[i] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i'_{fd} \\ i'_{ld} \\ i'_{lq} \end{bmatrix} \quad [u] = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u'_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Como es lógico, en régimen permanente no tendremos flujo y por lo tanto intensidad en los devanados de amortiguamiento debido a que partimos de que la máquina está completamente en sincronismo (estator y rotor).

1.3 Transformación a un marco de referencia "dq"

En este apartado se definirán unas nuevas inductancias en el marco "dq". Los flujos (abc) del anterior apartado pasarán a ser flujos (dq0) de los nuevos ejes de referencia.

Flujos en el estator:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= -l_d * i_d + l_{afd} * i_{fd} + l_{akd} * i_{kd} \\ \Psi_q &= -l_q * i_q + l_{akq} * i_{kq} \\ \Psi_0 &= -l_0 * i_0\end{aligned}\quad (3.5)$$

Donde:

i_d y i_q = Componentes del vector espacial i_s (corriente del estator).

Flujos en el rotor:

$$\begin{aligned}\Psi_{fd} &= x_{ffd} * i_{fd} + x_{fkd} * i_{kd} - \frac{3}{2} * x_{afd} * i_d \\ \Psi_{kd} &= x_{fkd} * i_{fd} + x_{kkd} * i_{kd} - \frac{3}{2} * x_{akd} * i_d \\ \Psi_{kq} &= x_{kkq} * i_{kq} - \frac{3}{2} * x_{akq} * i_q\end{aligned}\quad (3.6)$$

Tensiones en el estator:

$$\begin{aligned}u_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q * \frac{d\theta}{dt} - r_s * i_d \\ u_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d * \frac{d\theta}{dt} - r_s * i_q \\ u_0 &= \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_0}{dt} - r_s * i_0\end{aligned}\quad (3.7)$$

Donde:

$$\frac{d\theta}{dt} = w_r = w_s = \text{Velocidad síncrona.}$$

Tensiones en el rotor:

$$\begin{aligned}u_{fd}(t) &= \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_{fd}(t)}{dt} + r_{fd} * i_{fd}(t) \\ 0 &= \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_{kd}(t)}{dt} + r_{kd} * i_{kd}(t)\end{aligned}$$

$$0 = \frac{1}{w_b} \frac{d\Psi_{kq}(t)}{dt} + r_{kq} * i_{kq}(t) \quad (3.8)$$

Éstas ecuaciones quedan igual en el eje "dq" al no variar el eje de cuadratura.

1.4 Par electromagnético desarrollado por la máquina

$$T_e = \frac{3}{2} * p * (\Psi_d * i_q - \Psi_q * i_d) \quad (3.9)$$

Donde:

p = pares de polos

$$J \frac{dw_m}{dt} = T_m - T_e \quad (3.10)$$

Donde:

T_m = par mecánico de la máquina motriz (N.m)

T_e = par electromagnético (N.m)

J = momento de inercia total (turbina-generador, Kg*m²)

Como los valores que vamos a introducir como parámetros en nuestro proyecto son dados en por unidad (p.u), vamos a expresar todas las ecuaciones de la máquina en p.u para ello veremos cómo se calculan todas las bases. Los parámetros en p.u se calcularán dividiendo el parámetro en la unidad del sistema internacional (Ω , A, V, N*m, etc.) entre la base de ese parámetro.

2. Desarrollo de las principales ecuaciones dinámicas para los modelos estudiados

En este apartado se verán tanto las ecuaciones dinámicas utilizadas en los modelos estudiados como las cajas utilizadas en el Simulink para cada una de ellas, las cuales se han unido de forma lógica para formar el generador síncrono. Esto se podrá ver en el anexo 2 y 3 donde veremos la correlación de la dinámica y parámetros del modelo.

Dentro del anexo 1 están los archivos de datos ".m" los cuales se utilizan para la inicialización de la máquina síncrona; viéndose la nomenclatura de cada parámetro así como las salidas y entradas que se disponen.

Las dinámicas que se tienen son:

- Ecuación de posición:

$\delta = w_r * t - w_0 * t + \delta_0$ (si la máquina está en sincronismo, osea en régimen permanente si lo está; $t=0$)

$$\frac{d\delta}{dt} = w_r - w_0 = \Delta w_r \quad \text{siendo;} \quad \overline{\Delta w_r} = \frac{\Delta w_r}{w_0}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = w_0 * \Delta w_r \quad (3.11)$$

- La velocidad angular de la máquina (w_r).

Partimos de la ecuación del momento de inercia:

$$\frac{dw_m}{dt} = T_m - T_e; \quad y \quad H = \frac{1}{2} * \frac{J * w_{0m}^2}{S_{base}} \quad (3.12)$$

Sustituimos en J en la ecuación de la dinámica y nos da:

$$\frac{2 * H}{w_{0m}^2} * S_{base} * \frac{dw_m}{dt} = T_m - T_e; \quad 2 * H * \frac{d}{dt} \left(\frac{w_m}{w_{0m}} \right) = \frac{T_m - T_e}{S_{base} / w_{0m}} \quad (3.13)$$

$$\frac{d\Delta w_r}{dt} = \frac{1}{2 * H} * (T_m - T_e) \quad (3.14)$$

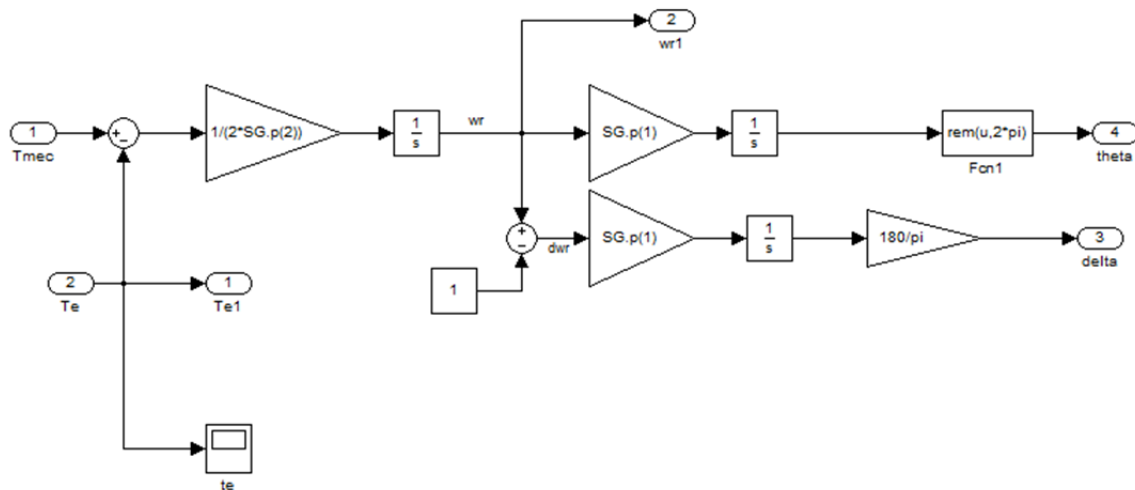


Figura 3.1: Dinámica delta y theta

Como se observa en esta figura 3.1 obtenemos también la respuesta del ángulo theta que no nos aporta una información característica, debido a que su ángulo no cambia respecto a otros modelos. Aun así la hemos representados para ver todos los ángulos de dicha máquina.

- La fuerza electromotriz en el eje q en bornes del generador (e_q).

Partimos de la ecuación de la tensión de excitación en el rotor.

$$\frac{1}{w_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} = e_{fd} - r_{fd} * i_{fd}; \text{ utilizando: } e_{fd} = u_{fd} \quad (3.14)$$

Para simplificar la ecuación multiplicamos por $\left(\frac{x_{ad}}{x_{ffd}}\right)$ dándonos:

$$\frac{1}{w_b} * \frac{d}{dt} * \left(\frac{x_{ad}}{x_{ffd}} * \psi_{fd}\right) = \left(\frac{x_{ad}}{x_{ffd}} * e_{fd}\right) - \frac{x_{ad}}{x_{ffd}} * r_{fd} * i_{fd}; \quad (3.15)$$

El primer paréntesis es e'_q y en el segundo paréntesis necesitamos multiplicar y dividir por r_{fd} para sacar E_{fd} debido a q:

$$E_{fd} = \frac{x_{ad}}{r_{fd}} * e_{fd} \quad \text{siendo el resultado:}$$

$$\frac{1}{w_b} \frac{de_q}{dt} = E_{fd} * \frac{r_{fd}}{x_{ffd}} - \frac{r_{fd}}{x_{ffd}} * x_{ad} * i_{fd} \quad (3.16)$$

Y como:

$$T_d'0 = T_1 = \frac{x_{ad} + x_{fd}}{r_{fd}} = \frac{x_{ffd}}{r_{fd}} \quad y \quad EI = x_{ad} * i_{fd} \quad (3.17)$$

Tenemos:

$$\frac{1}{w_b} \frac{de_q}{dt} = \frac{1}{T_d'0} * (E_{fd} - EI) \quad (3.18)$$

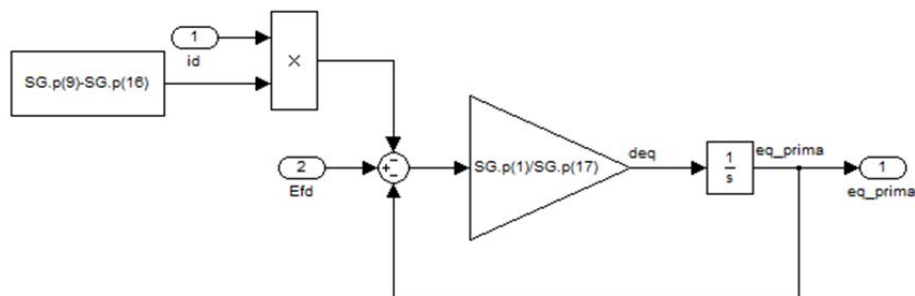


Figura 3.2. Dinámica e_q'

- La fuerza electromotriz en el eje d en bornas del generador (e_d).

Tenemos:

$$\frac{1}{w_b} \frac{de_d}{dt} = \frac{1}{T_{q'0}} * (-E_{d_{prima}} + (X_q - X_{qq}) * i_q) \quad (3.19)$$

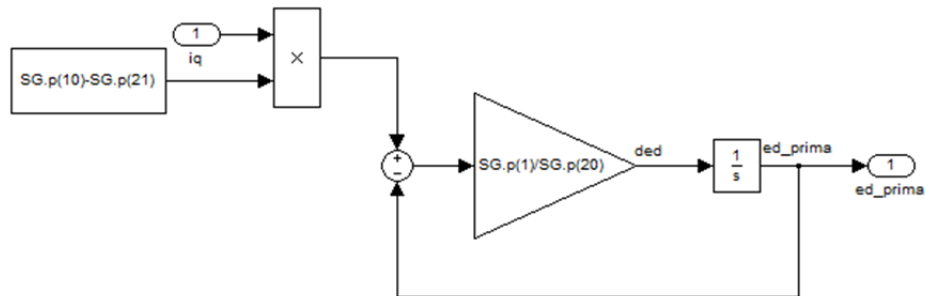


Figura 3.3. Dinámica e_d'

Estas cuatro ecuaciones dinámicas son las utilizadas para todos los modelos realizados, la ecuación de posición y la velocidad angular son las utilizadas en el modelo de 2º Orden, para el modelo de 3er Orden se han utilizado esas mismas mas la tensión en el eje de cuadratura(e_q) y para el modelo de 4º Orden todas. Para las comparaciones también se utilizará un modelo en el que se encuentran todas las dinámicas; con ello se verá la clara diferencia de la respuesta de los principales parámetros. Se empleará un modelo de regulador de velocidad, el cual servirá para la recuperación de la señal a su valor nominal en los modelos en los que no se dispone de devanados de amortiguamiento, es decir, en los tres modelos realizados.

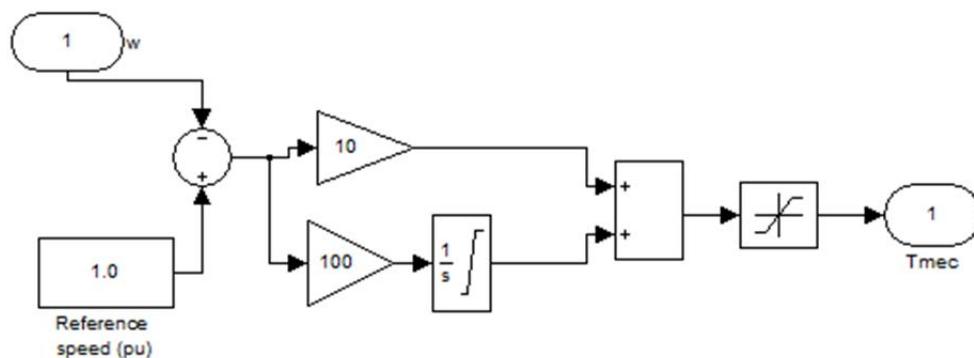


Figura 3.4: Regulador de velocidad

El tipo de regulador es un PI, siendo uno de los más apropiados para este tipo de estudios. La configuración en Simulink se ve en la figura 3.4.[2]

3. Valores base de la máquina síncrona

Los valores base del generador son indispensables para conseguir los valores en por unidad (p.u). Entre estos valores base y el valor real de cualquier parámetro de la máquina síncrona se consiguen los valores en p.u como se expresa a continuación. Estos últimos van a ser utilizados en todas las operaciones del sistema eléctrico. La utilización de los valores en p.u es para no tener que realizar continuamente cambios de base en todas las operaciones. El valor final se da en p.u para luego (en caso de que interese) y multiplicándolo por su valor base, obtener el valor real.

$$Valor_{p.u} = \frac{Valor_{REAL}}{Valor_{BASE}}$$

La forma de sacar los valores base se expresan a continuación. [1]

3.1. Valores facilitados por la placa del generador

S_{base} = Voltamperios trifásicos nominales de la máquina (VA).

V_{base} = Valor pico de la tensión fase-tierra (V).

F_{base} = Frecuencia nominal (Hz).

P = Pares de polos.

Estos valores se encuentran ubicados en la placa del generador síncrono o en el caso de no estar en posesión de éste, serán facilitados por el fabricante. Con estos valores podremos calcular todos los valores base de la máquina y utilizarlos para el posterior cálculo de las ecuaciones en p.u. de la máquina. [1]

3.2. Valores en el estator de la máquina

$$i_{sbase} = \frac{S_{base}}{(\sqrt{3}/2) * V_{sbase}}; \text{corriente de línea pico (A)} \quad (3.20)$$

$$Z_{sbase} = \frac{V_{sbase}}{i_{sbase}}; \text{impedancia } (\Omega) \quad (3.21)$$

$$\omega_{base} = 2 * \pi * f_{base}; \text{velocidad (rad/s eléctricos)} \quad (3.22)$$

$$\omega_{mbase} = \frac{\omega_{base}}{p}; \text{velocidad (rad/s mecánicos)} \quad (3.23)$$

$$X_{sbase} = \frac{Z_{sbase}}{\omega_{base}}; \text{inductancia (H)} \quad (3.24)$$

$$\Psi_{base} = X_{sbase} * i_{sbase}; \text{flujo (Wb – vueltas)} \quad (3.25)$$

3.3. Valores en el rotor de la máquina

$$i_{fd\ base} = \frac{X_{ad}}{X_{afd}} * i_{sbase}; \text{intensidad fd (A)} \quad (3.26)$$

$$i_{kd\ base} = \frac{X_{ad}}{X_{akd}} * i_{sbase}; \text{intensidad kd (A)} \quad (3.27)$$

$$i_{kq\ base} = \frac{X_{aq}}{X_{akq}} * i_{sbase}; \text{intensidad kq (A)} \quad (3.28)$$

$$u_{fd\ base} = \frac{S_{base}}{i_{fd\ base}}; \text{tensión rotor (V)} \quad (3.29)$$

$$Z_{fd\ base} = \frac{u_{fd\ base}}{i_{fd\ base}} = \frac{S_{base}}{i_{fd\ base}^2}; \text{impedancia } (\Omega) \quad (3.30)$$

$$Z_{kd\ base} = \frac{S_{base}}{i_{kd\ base}^2}; \text{impedancia } (\Omega) \quad (3.31)$$

$$Z_{kq\ base} = \frac{S_{base}}{i_{kq\ base}^2}; \text{impedancia } (\Omega) \quad (3.32)$$

$$X_{fd\ base} = \frac{Z_{fd\ base}}{\omega_{base}}; \text{inductancia (H)} \quad (3.33)$$

$$X_{kd\ base} = \frac{Z_{kd\ base}}{\omega_{base}}; \text{inductancia (H)} \quad (3.34)$$

$$X_{kq\ base} = \frac{Z_{kq\ base}}{\omega_{base}}; \text{inductancia (H)} \quad (3.35)$$

$$T_{base} = \frac{S_{base}}{\omega_{base}}; \text{Par (N * m)} \quad (3.36)$$

4. ECUACIONES EN P.U DE LA MÁQUINA SINCRONA

El valor en por unidad de cualquier cantidad se define como la razón entre la cantidad y su base. La relación en porcentaje es 100 veces el valor en por unidad. Ambos métodos de cálculo, porcentual y en por unidad, son más simples y más informativos que los voltios, los amperios y los ohm reales. El método en por unidad tiene una ventaja sobre el porcentual: el producto de dos cantidades expresadas en por unidad queda expresado también en por unidad, mientras que el producto de dos cantidades dadas en por ciento se debe dividir por 100 para obtener el resultado en por ciento.

Las ecuaciones en p.u. son necesarias para poder operar fácilmente y no tener que estar preocupado por las unidades de cada operación, además si queremos interaccionar matemáticamente con la red (para realizar pruebas etc.) debemos utilizar las mismas unidades.

Por ejemplo, si en nuestra red tenemos numerosos transformadores, generadores, líneas, etc. debemos de expresarlos en p.u ya que si no es así los cálculos pueden ser numerosos.

Cuando se emplean valores en por unidad, se simplifica la resolución de problemas, entre otras cosas, porque ello permite eliminar las razones de transformación (cuando existen transformadores) y efectuar comparaciones en forma mucho más sencilla.[1]

4.1. Ecuaciones de las tensiones del estator

$$\begin{aligned}u_d &= \frac{1}{w_{base}} * \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q * w_r - r_s * i_d \\u_q &= \frac{1}{w_{base}} * \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d * w_r - r_s * i_q \\u_0 &= \frac{1}{w_{base}} * \frac{d\Psi_0}{dt} - r_s * i_0\end{aligned}\tag{3.37}$$

4.2. Ecuaciones de las tensiones del rotor

$$\begin{aligned}
 u_{fd} &= \frac{1}{w_{base}} * \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + r_{fd} * i_{fd} \\
 0 &= \frac{1}{w_{base}} * \frac{d\Psi_{kd}}{dt} + r_{kd} * i_{kd} \\
 0 &= \frac{1}{w_{base}} * \frac{d\Psi_{kq}}{dt} + r_{kq} * i_{kq}
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

4.3. Ecuaciones de los enlaces de flujo en el estator

$$x_d = x_l + x_{ad} \quad x_q = x_l + x_{aq}$$

Donde:

x_l = Reactancia de dispersión

x_{ad} = Reactancia mutua eje d

x_{aq} = Reactancia mutua eje q

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= -l_d * i_d + l_{ad} * i_{fd} + l_{akd} * i_{kd} \\
 \Psi_q &= -l_q * i_q + l_{akq} * i_{kq} \\
 \Psi_0 &= -l_0 * i_0
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

4.4. Ecuaciones de los enlaces de flujo en el rotor

$$\begin{aligned}
 \Psi_{fd} &= x_{ffd} * i_{fd} + x_{fkd} * i_{kd} - x_{ad} * i_d \\
 \Psi_{kd} &= x_{fkd} * i_{fd} + x_{kkd} * i_{kd} - x_{ad} * i_d \\
 \Psi_{kq} &= x_{kkq} * i_{kq} - x_{aq} * i_q
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

Donde:

$$x_{afq} = x_{aq} \quad x_{akd} = x_{aq} \quad x_{ffd} = x_{ad} + x_{lfd}$$

$$x_{kkd} = x_m + x_{lkd} \quad x_{kkq} = x_m + x_{lkq}$$



4.5. Ecuaciones del par y velocidad angular

$$T_e = \Psi_d * i_q + \Psi_q * i_d \quad \frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{2*H} (T_m - T_e) \quad (3.41)$$

Donde:

$$J = 2 * H$$



CAPÍTULO 4: ESTABILIDAD

EN LOS SISTEMAS

ELECTRICOS



El problema de la estabilidad ha afectado a la planificación protección y control de los sistemas eléctricos. Por un lado la estabilidad del sistema ha impuesto límites a la red de transporte inferiores a los límites térmicos pero por otro lado los sistemas de control y protección han permitido incluso aumentar estos límites.

La estabilidad estudiada en el comportamiento dinámico de los sistemas de potencia son de dos tipos: transitorios y de estado estable.

Un sistema de potencia es estable si todas las variables que se miden son constantes o llegan a ser constantes después de la perturbación y llegan a su valor inicial o aproximarse

En resumen, la estabilidad es la propiedad de una máquina síncrona o de sus componentes de mantener un estado de equilibrio (sincronismo), cuando ha sido sometido a perturbadoras, ya sean de la red o de la misma máquina. El concepto puede ser aplicado a una o varias máquinas para señalar la condición de que ellas se mantienen en sincronismo respecto de otras cuando hay algún tipo de variación en el sistema.

1. Estabilidad del ángulo del rotor

La estabilidad del ángulo del rotor es la propiedad que disponen los generadores interconectados a un sistema eléctrico para estar en sincronismo. Si se dispone de más de un generador, cada uno de ellos debe tener la misma frecuencia respecto del otro y la velocidad mecánica debe estar sincronizada a dicha frecuencia para permanecer en sincronismo. El campos producidos por el generador producen un par electromagnético, el cual se opone a la rotación del rotor, para que el par mecánico sea aplicado por la turbina y mantener la rotación; el par eléctrico de salida de generador (P_e) puede ser variada mediante la acción de la turbina, provocando que el rotor avance a una nueva posición con respecto al campo rotativo del estator.

Cuando el generador está en condiciones normales (régimen permanente), la velocidad del campo del estator es el mismo que la del rotor. El problema existe



cuando estos dos campos no son iguales lo que produce una inestabilidad, que dependiendo del tipo de contratiempo puede provocar que el rotor se embale.[8]

1.1 Relación Potencia-Ángulo:

La relación existente entre los cambios de potencias entre generadores y líneas y la posición angular de los rotores es una de las características más importantes a tener en cuenta en la estabilidad de sistemas de potencia.

La variación de la potencia depende exclusivamente del ángulo de carga debido a que, como veremos en la ecuación 3.1, las demás variables son constantes o van directamente relacionadas.

$$P = \frac{E_G * E_C}{X_T} * \sin \delta \quad (4.1)$$

Donde:

P= Potencia activa

E_G= Tensión en bornes del generador

δ=ángulo de carga

E_C= Tensión en bornes de las cargas

X_T= Reactancias de la línea

Vista la ecuación anterior se puede decir que la potencia depende del seno del ángulo, siendo una relación no lineal como vemos en la figura 4.1.

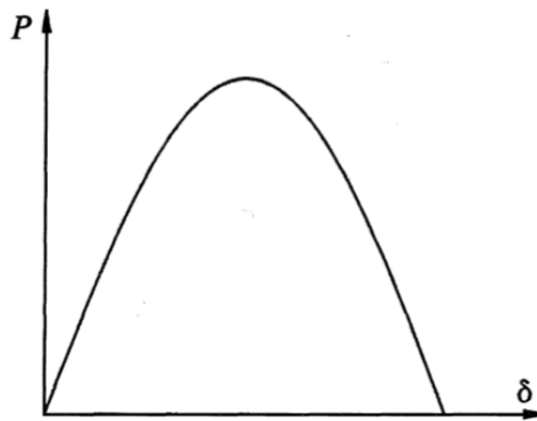


Figura 4.1. Curva Potencia-Ángulo simple

Cuando el ángulo es 0 no se transmite ningún tipo de potencia al sistema. Mientras el ángulo aumenta, la potencia va aumentando de la misma forma hasta que llega a un valor máximo. Cuando el ángulo supera los 90° la transferencia de potencia empieza a disminuir hasta llegar a 0. Cuando el generador se encuentra en la máxima potencia, la tensión interna es la máxima mientras que las reactancias son inversamente proporcionales.

En el caso de los cortocircuitos con objeto de estudio, se obtienen tres posibilidades de reacción del generador, las cuales se verán en la figura 4.2.

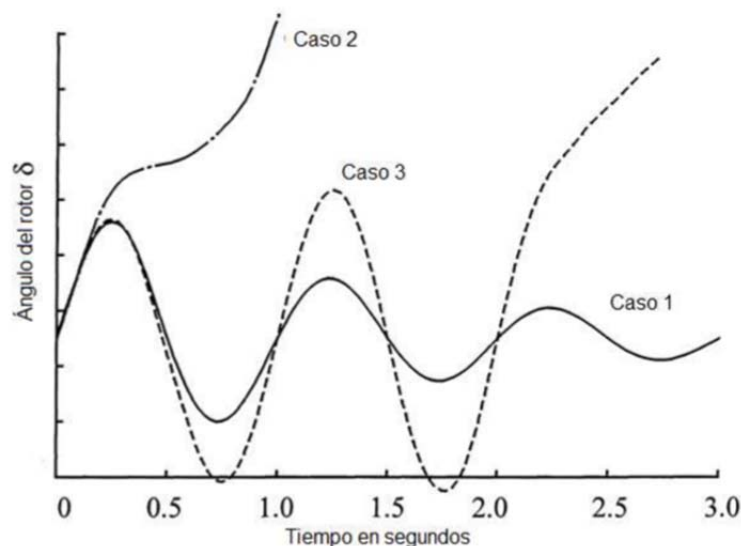


Figura 4.2. Curva Potencia-Ángulo ejemplos

En el caso 1 el ángulo del rotor oscila continuamente hasta ir amortiguándose y aproximarse a su valor en régimen permanente (el sistema es estable). En el caso 2, el



ángulo del rotor continua incrementándose hasta perder totalmente el sincronismo con el estator y se produce por falta de par sincronizante (el sistema es inestable de primera oscilación). En el caso 3, el sistema parece que es estable pero en la segunda oscilación se hace inestable debido a que las oscilaciones son crecientes.

Los estudios de estabilidad se suelen realizar de 3 a 5 segundos, pero en este proyecto los estudios se han realizado de 10 segundos para observar claramente el valor final de la señal.

2. Estabilidad transitoria

Estudiando la estabilidad transitoria se proporcionan la información suficiente para conocer la capacidad de una máquina de permanecer en sincronismo durante grandes perturbaciones tales como:

- Cambios bruscos momentáneos.
- Pérdidas de generación.
- Pérdida de líneas importantes.
- Faltas de tipo cortocircuitos y fases abiertas. (Estas son las que se estudiarán en nuestra máquina).

En la máquina síncrona este tipo de perturbaciones provoca un cambio de tensión, velocidad de la máquina, par electromecánico, corrientes y potencias. En las pruebas realizadas en los diferentes modelos se verán perfectamente la variación de todos estos parámetros, siendo los principales del estudio.

Para el estudio de la estabilidad transitoria, los generadores se analizan individualmente, aunque en sistemas grandes de más máquinas se puedan unir varios de ellos y formar máquinas equivalentes para su estudio. La respuesta y el comportamiento de cada máquina se describen mediante una ecuación diferencial (ecuación de oscilación). Las pautas y simplificaciones principales para utilizar esta ecuación son las siguientes:

- Como variable fundamental se emplea la posición angular del rotor δ . Este ángulo va a ser un parámetro fundamental en nuestro estudio de estabilidad, ya que δ nos va a indicar perfectamente si la máquina es estable o no.
- Debido a la gran inercia de las máquinas, las variaciones de velocidad son pequeñas, por lo que los elementos estáticos como las líneas o los transformadores se suponen operando a frecuencia nominal.
- Los motores síncronos se representan como una máquina más.
- Generalmente no se consideran los efectos de amortiguación, solo se considerará en el modelo completo de 8º Orden.
- En el caso de una perturbación balanceada, las ecuaciones algebraicas de acoplamiento son las correspondientes al flujo de potencias. No se utilizarán perturbación no balanceada ya que solo se realizarán cortocircuitos equilibrados.[4]

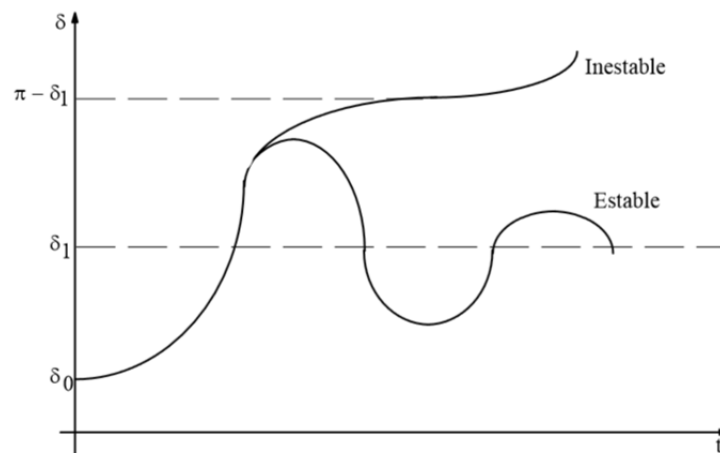


Figura 4.3. Curvas de oscilación de una máquina síncrona

Como bien se observa en la figura 4.3 las dos posibilidades que se pueden tener es que la máquina sea inestable (objetivo no deseado) o que la máquina sea estable y regrese con el paso del tiempo a su valor inicial, o en su defecto un valor muy parecido.

3. Ejemplo de estabilidad estática

Se tiene una máquina síncrona cilíndrica de resistencia de estator R despreciable, intensidad de excitación I_e y reactancia síncrona X_s constantes que está funcionando como generador acoplada a una red de potencia infinita.

Si se tuvieran estos parámetros la curva de par de la máquina, restringida a la zona de funcionamiento como generador, es la representada en la Figura 4.4.

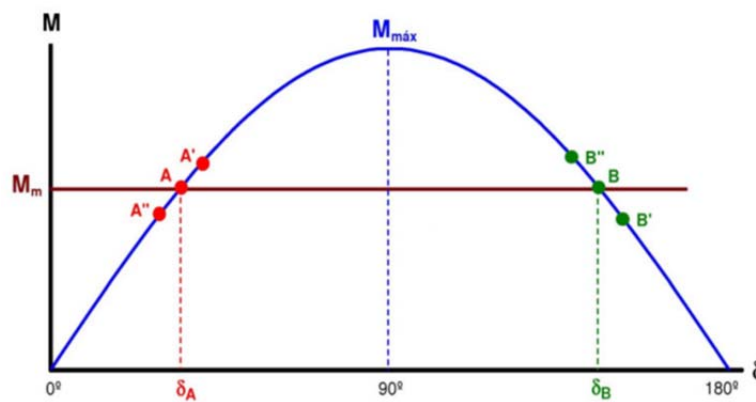


Figura 4.4. Estabilidad estática de un generador síncrono en red de potencia infinita

Se observa que en la Figura 4.4 si la máquina está proporcionando un par constante, se puede estar funcionando en dos puntos diferentes (A y B). Se va a estudiar la estabilidad de la máquina en ambos puntos.

Si la máquina funcionara en el punto A, con el ángulo de par δ_A , y se produce un aumento transitorio del par motor se provocaría un aumento del par, con lo cual el ángulo de par pasa a ser δ_A' . La máquina síncrona pasa, entonces, a colocarse en el punto A'. Cuando la perturbación ya no exista, el par del motor vuelve a su estado inicial pero la inercia mecánica de la máquina impide que el ángulo de par vuelva instantáneamente a valer δ_A , debido a la inercia mecánica del motor.

En este caso la máquina se encontraría en un estado de desequilibrio de pares: el par motor es M_m y el par de la máquina es MA' . En este caso, la máquina síncrona está funcionando como generador, lo que significa que ejerce un par de frenado(al ser el par de la máquina mayor al par que producimos), lo cual produce una disminución de



la velocidad. Esto provoca que vaya bajando el par poco a poco hasta colocarse en el punto de equilibrio.

Al contrario ocurre en el punto A'', cuyo ángulo de par es $\delta A''$. El par de la máquina es ligeramente inferior, por lo tanto, el par motor es mayor que el par de frenado y la máquina aumentará su velocidad. Esto provoca que el par vaya aumentando y con él, el ángulo hasta regresar a valer δA y se alcancen otra vez el punto de equilibrio y la velocidad de sincronismo.

En resumen, aunque aparezcan perturbaciones transitorias que modifiquen, tanto en sentido positivo como negativo, el ángulo de par con respecto al punto de equilibrio inicial; la máquina recupera su estado inicial. Por lo tanto, el punto A es un punto de funcionamiento estable del generador síncrono.

Supongamos que ahora la máquina se encuentra inicialmente en el punto B y que se produce una pequeña perturbación transitoria que provoca una ligera disminución del par con lo que el ángulo del par pasa a ser $\delta B'$. La máquina síncrona se coloca, entonces, en el punto B'. En el momento de desaparecer la perturbación el par de la máquina es inferior, por lo tanto, el par motor es mayor que el par de frenado y la máquina aumentará su velocidad hasta perder el sincronismo, ya que el ángulo de par aumenta y se va separando cada vez más del ángulo inicial δB .

Si por el contrario, produjo un aumento de par pasa todo lo contrario y el par de la máquina se va separando del punto de equilibrio δB hasta llegar a igualarle, pero en este caso en el punto A.

En resumen, si aparecen perturbaciones transitorias en el punto de equilibrio inicial B; la máquina no recupera el equilibrio en este punto. Por lo tanto, el punto B es un punto de funcionamiento inestable del generador síncrono.

Se deduce, entonces, que los puntos estables de funcionamiento del generador síncrono cuyos ángulos de par δ estén comprendidos entre 0 y 90° son estables, mientras que si están comprendidos entre 90 y 180° son inestables. Luego, el ángulo de par $\delta = 90^\circ$ es el límite de estabilidad estática.[6]



4. Métodos para aumentar la estabilidad de la máquina síncrona.

Este tipo de perturbaciones y las consecuentes oscilaciones referidas en el capítulo anterior se pueden solucionar mediante diferentes métodos que aumentan la estabilidad de la máquina. Son los siguientes:

- Reducir la reactancia de cortocircuito en el generador, lo cual es muy complicado reducirlas en máquinas de este tipo y es conveniente que tanto la reactancia de dispersión como la del inducido sean pequeñas.
- Se tendrá en cuenta que la potencia que se debe transportar en la línea no debe ser superior al 70% de la potencia que soportan las líneas en régimen estático, por lo que la generación del generador debe adaptarse a estas restricciones
- Es conveniente tener en cada una de las máquinas todos aquellos dispositivos que ayuden a mantener a la máquina en sincronismo, como excitatrices para que la tensión varíe rápidamente según convenga, reguladores de velocidad, etc.
- Un aumento de la inercia mecánica de las partes rotativas, porque obviamente aumenta el periodo de recuperación, dando así más tiempo a los órganos reguladores.[7]



CAPÍTULO 5: PRUEBAS DEL **ESTUDIO REALIZADO**



Las pruebas que se representan en este apartado son las expuestas anteriormente. En cada uno de los modelos se incluyen las tablas con los resultados más importantes adquiridos en estas pruebas así como las ondas senoidales más importantes y representativas.

Para la comprensión y la comparación de las gráficas expuestas en todos los modelos, se representan con los mismos tipos de cortocircuitos y el mismo tiempo, tanto de inicio de cortocircuito como de duración de este.

Se estudia para todos los modelos la misma situación. Primero se realiza una prueba donde la duración del cortocircuito será de 0.05sg. tanto sin regulador de velocidad como con él. En segundo lugar se obtiene el tiempo máximo de duración del cortocircuito sin regulador de velocidad para que el sistema sea estable y se hace lo mismo pero con el tiempo máximo de cortocircuito.

Respecto a las gráficas que se muestran en este apartado, se miden todas con un cortocircuito de 0.05sg, ocurrido a los 0.5sg y siendo la duración total de la medición de 10 sg, menos el modelo de tercer orden sin regulador que se ha realizado con una medición de 30 sg. al no apreciarse bien el resultado final.

Aspectos importantes para definir las tablas siguientes:

Valor nominal: Es aquel valor de la variable cuando la máquina se encuentra en régimen permanente.

Valor más desfavorable: Es el valor máximo que alcanza la variable, ya sea positivamente o negativamente (al ser onda sinusoidal).

Valor final: Valor por el cual queda definida la variable de estudio después del cortocircuito.

Tiempo aproximado de estabilización: Es el tiempo aproximado que tarda la señal en estabilizarse, desde que se restablece el cortocircuito producido hasta que llega al valor final $\pm 5\%$.

Los parámetros que se utilizarán para todos los modelos de estudio se encuentran en el Anexo 1, donde también se incluirán cada una de las ecuaciones de los modelos.

1. Modelo clásico (Orden 2)

El modelo clásico o modelo de orden 2, como su propio nombre indica tiene dos variables de estado que son: el ángulo de carga (δ) y la velocidad angular (w_r). Para realizar los cálculos correspondientes a este modelo se toman varias consideraciones. La primera de ellas es que la tensión (e_q') la consideramos constante y la segunda es que la w_r es aproximadamente 1 por lo tanto la potencia eléctrica (P) es igual al par electromecánico (T_e).

Este modelo es el más simple y menos efectivo debido a que solo dispone de dos variables de estado (siendo además variables mecánicas) y si no introducimos un regulador de velocidad o algo parecido que nos estabilice la señal el sistema oscilará en todo momento.

- **Datos del estudio:**
 - **Hueco de tensión 0.05sg.**
 - **Sin regulador de velocidad.**

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,194	0,478	Valor oscilando	Valor oscilando
Delta(δ)	14,7321	21	21	Valor oscilando	Valor oscilando
Potencia Activa(P)	0,88	0	1,2125	Valor oscilando	Valor oscilando
Par(T_e)	0,9108	0,3905	0,5375	Valor oscilando	Valor oscilando
Velocidad angular(w_r)	1	1,0043	1,0046	Valor oscilando	Valor oscilando

Tabla 5.1: Resultados modelo Orden 2 (corto de duración 0.05sg.) sin regulador

Desde las figuras 5.1 hasta la 5.4 se verán las variables más significativas del modelo de orden 2 sin regulador de velocidad.

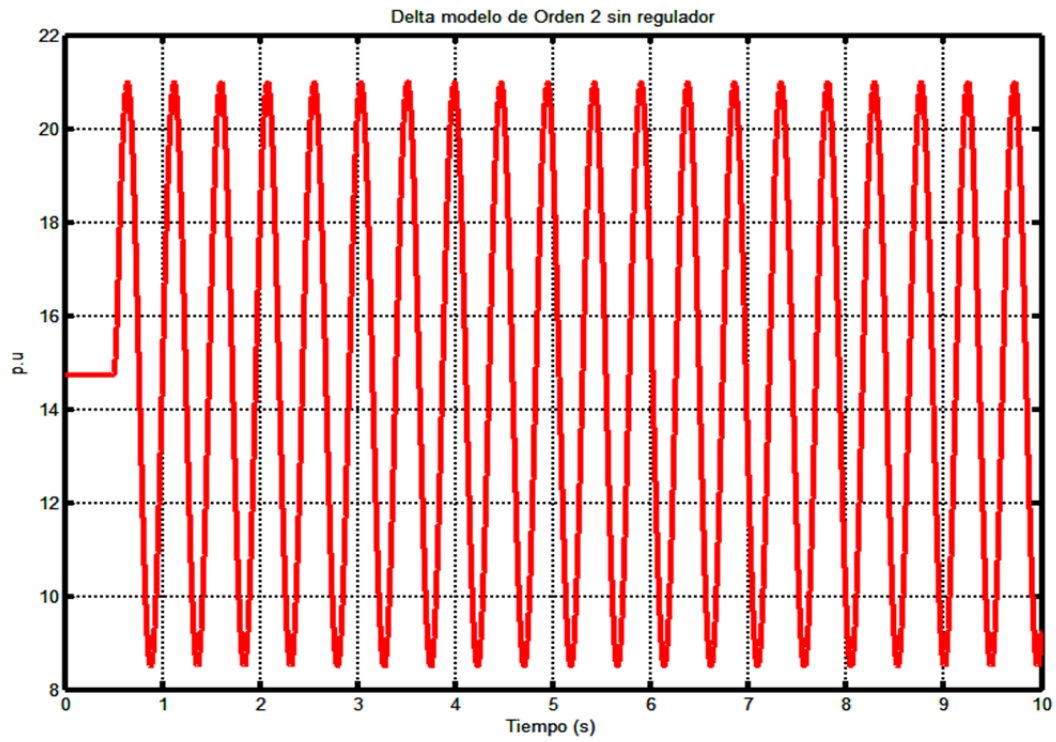


Figura 5.1: Ángulo de desfase sin regulador

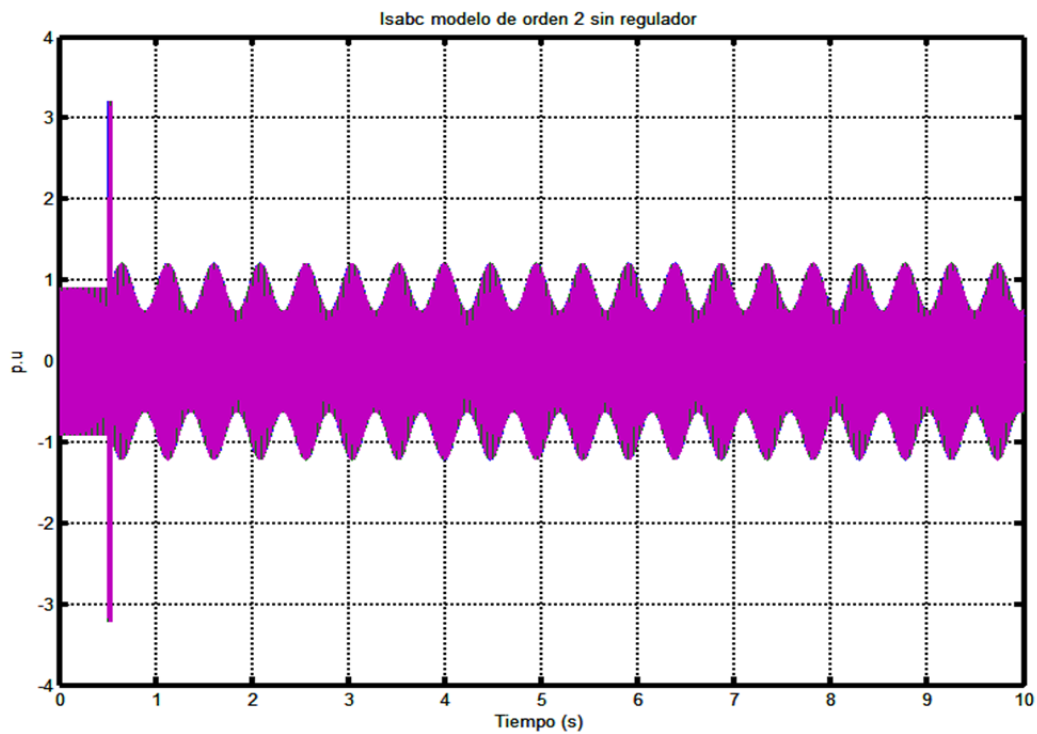


Figura 5.2: Intensidad del estator "abc" sin regulador

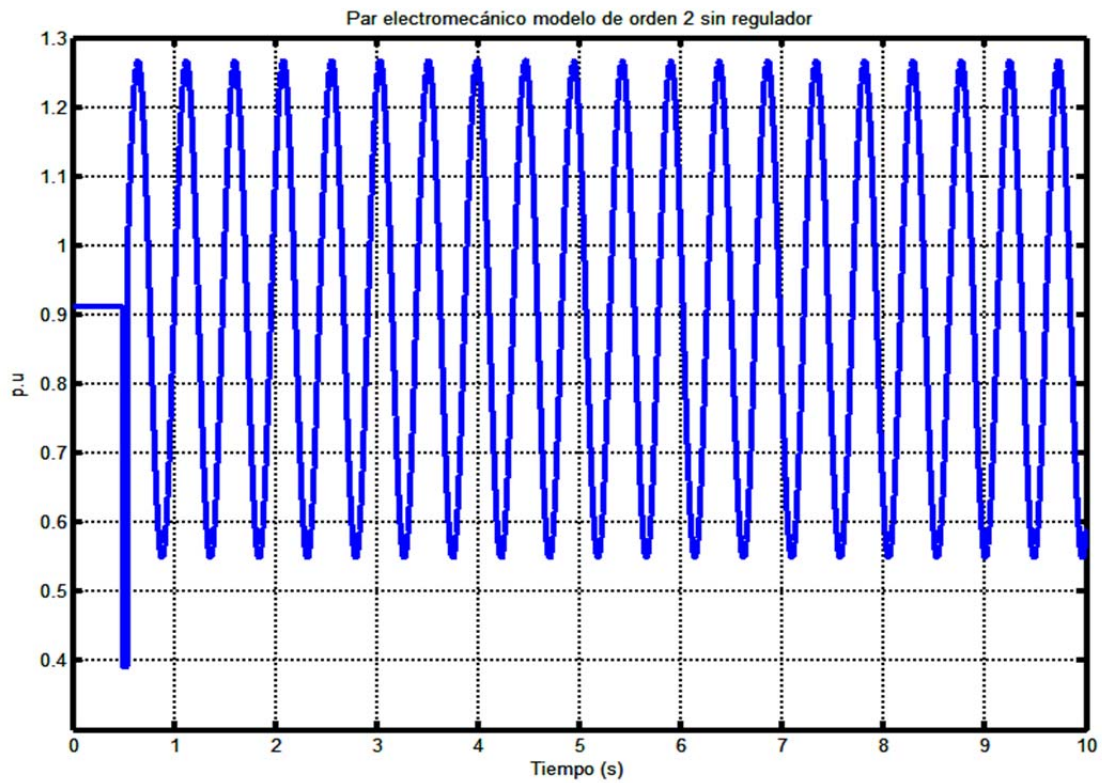


Figura 5.3: Par electromecánico sin regulador

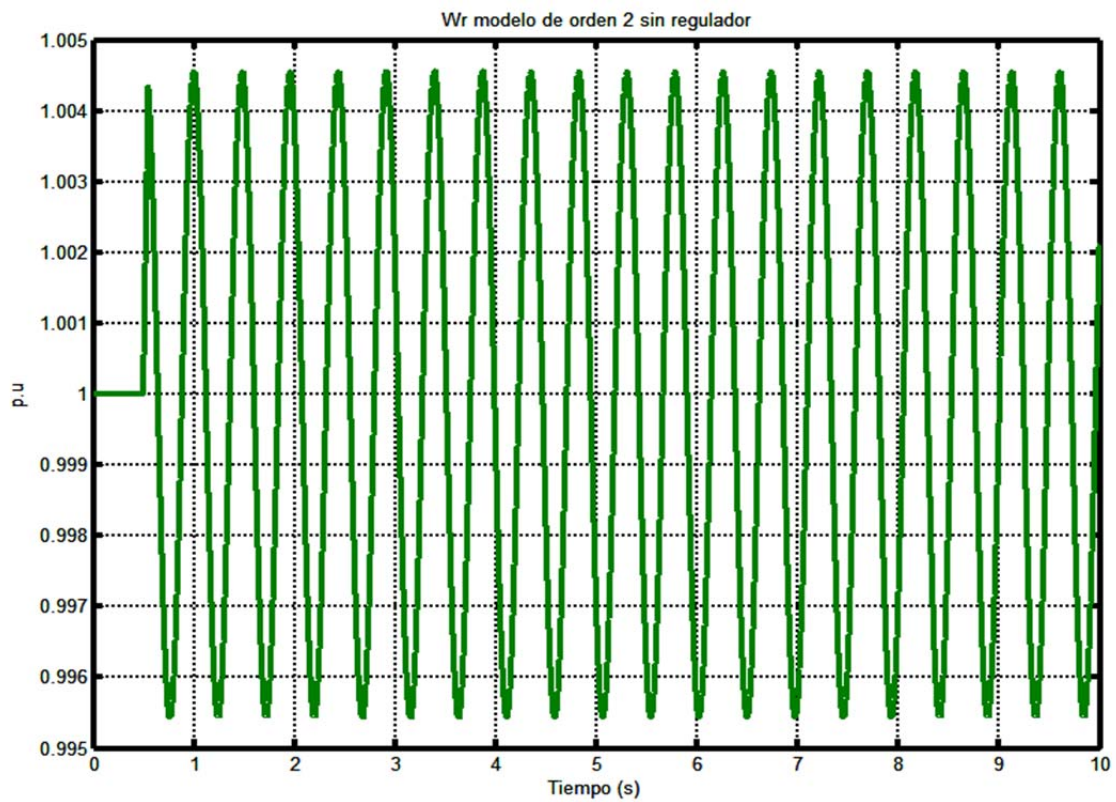


Figura 5.4: Velocidad angular sin regulador



La figura del ángulo de desfase se va a tomar como referencia en todas las pruebas ya que es la más representativa para indicarnos si la máquina síncrona es estable o no lo es. En este caso se observa como desde que se produce el cortocircuito ($t=0.5$) el sistema oscila en todo momento ya que no se dispone de un regulador.

En el resto de variables ocurre lo mismo, siendo significativo el pico que se genera en la intensidad del estator hasta que se recupera el cortocircuito.

- Con regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,194	0,328	0,4172	3
delta(δ)	14,7321	21	20,169	14,7321	6
Potencia Activa(P)	0,88	0	1,17	0,88	5,5
Par(T_e)	0,9108	0,3905	1,2215	0,9108	6
Velocidad angular(W_r)	1	1,0041	1,0041	1	6

Tabla 5.2: Resultados modelo Orden 2 (corto de duración 0.05sg.) con regulador

Desde las figuras 5.5 hasta la 5.8 se verán las variables más significativas del modelo de orden 2 con regulador de velocidad.

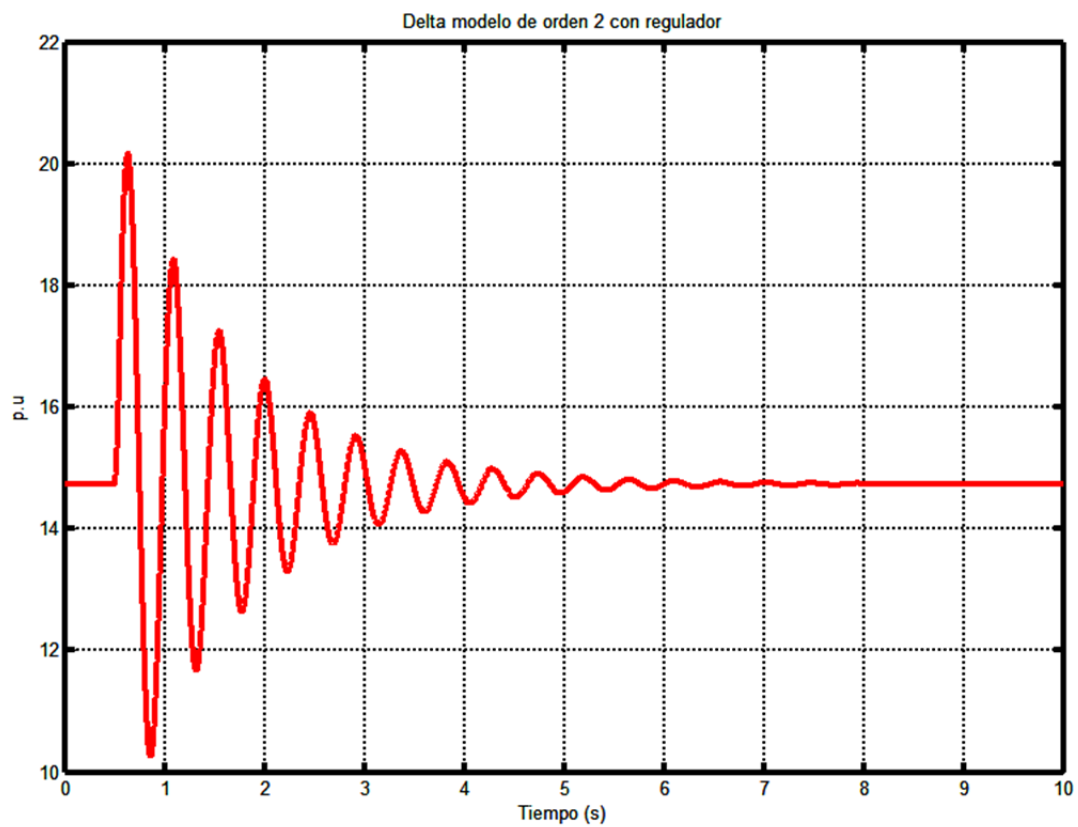


Figura 5.5: Ángulo de desfase con regulador

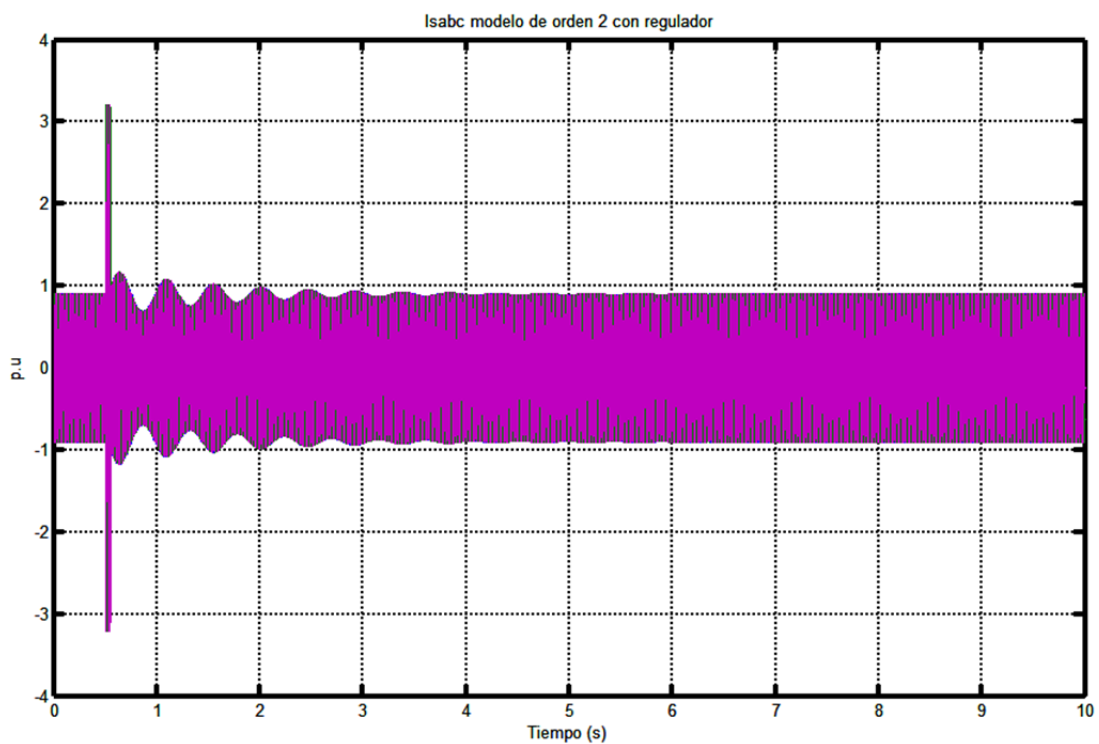


Figura 5.6: Intensidad del estator "abc" con regulador

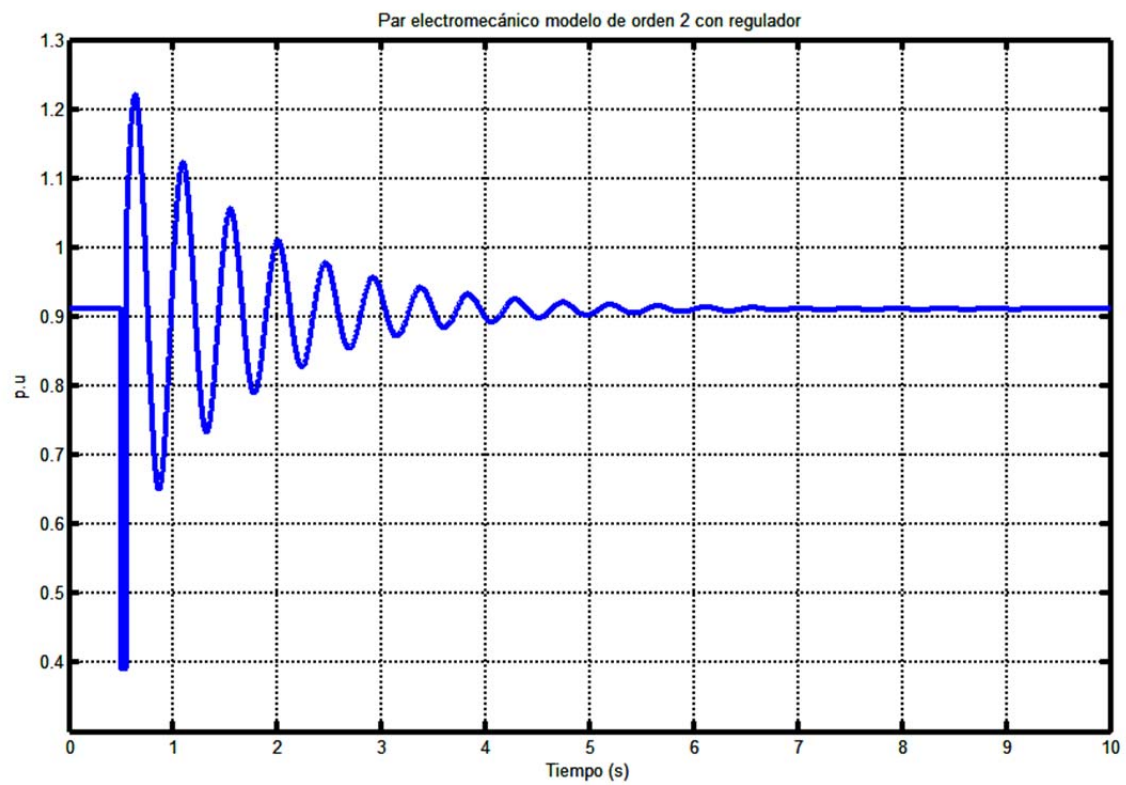


Figura 5.7: Par electromecánico con regulador

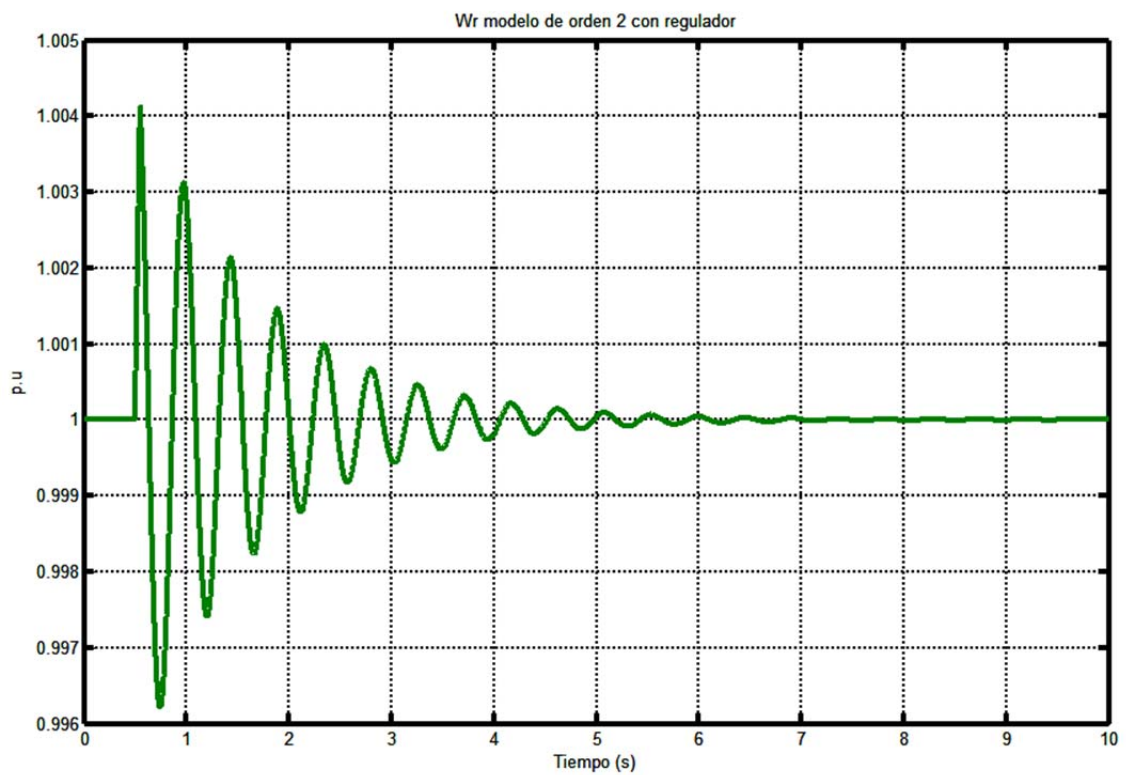


Figura 5.8: Velocidad angular con regulador

Dentro de este modelo, la clara diferencia que se obtiene al realizar las pruebas sin regulador de velocidad a hacerlo con el regulador es obvia. En todas y cada una de las tablas expuestas anteriormente se ve como en cuanto se recupera el cortocircuito la máquina empieza a oscilar hasta llegar a su valor inicial teniendo un tiempo máximo de oscilación de 6sg. como se observa en la tabla. En la figura 5.9 se observa una diferencia clara del ángulo delta cuando lleva regulador de velocidad a cuando no lleva.

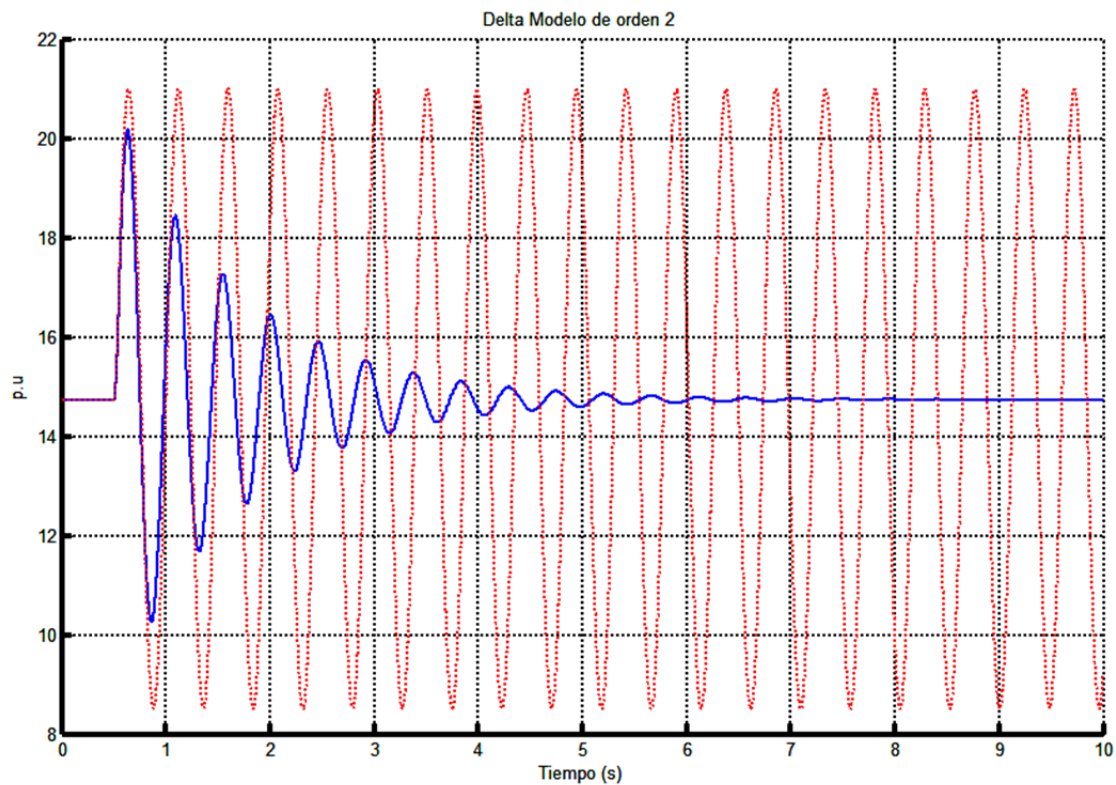


Figura 5.9: Ángulo delta

La línea continua azul es el ángulo delta con regulador de velocidad y la roja discontinua es sin regulador de velocidad. Se observa claramente la función que realiza el regulador de velocidad en este modelo. Conseguimos que la señal llegue a su valor inicial impidiendo el continuamente oscile.



- Hueco de tensión máximo para que la máquina sea estable 0.37sg.
 - Sin regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{sd})	0,4172	3,194	5,52	Valor oscilando	Valor oscilando
delta(δ)	14,7321		152,35	Valor oscilando	Valor oscilando
Potencia Activa(P)	0,88	0	-3,512	Valor oscilando	Valor oscilando
Par(T_e)	0,9108	0,3905	-2,825	Valor oscilando	Valor oscilando
Velocidad angular(W_r)	1		1,07	Valor oscilando	Valor oscilando

Tabla 5.3: Resultados modelo Orden 2 (corto de duración 0.37sg.) sin regulador

- Con regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{sd})	0,4172	3,1943	2,9792	0,3937	4
delta(δ)	14,7321		92	10,1905	6,5
Potencia Activa(P)	0,88	0	-2,728	0,629	6,5
Par(T_e)	0,9108	0,3905	3,6085	0,6471	7
Velocidad angular(W_r)	1	1,016	0,9506	1	6,5

Tabla 5.4: Resultados modelo Orden 2 (corto de duración 0.37sg.) con regulador

Como se observa en estas tablas el hueco de tensión máximo para que la máquina síncrona sea estable es de 0.37sg; a partir del cual la máquina es inestable. En este apartado no se han expresado las gráficas debido a que son muy similares a las del cortocircuito de 0.05sg. de duración pero con valores de estabilización diferentes.

En los huecos remarcados en los que no se obtiene valor es debido a que en todo el tiempo del cortocircuito el valor va aumentando continuamente, viéndose una pendiente positiva continua.

2. Modelo de un eje (Orden 3)

El modelo de un eje o modelo de orden 3, dispone de tres variables de estado que son: el ángulo de carga (δ) y la velocidad angular (ω_r) y la tensión del estator en eje de cuadratura (e_q'), siendo esta última la variable que diferencia a este modelo y al modelo clásico. Este modelo es el más simple para que la regulación sea automática y no se necesite un regulador externo.

El principal problema es que al disponer solo de la regulación eléctrica en e_q' , la estabilización es bastante lenta.

- **Datos del estudio:**
 - **Hueco de tensión 0.05sg.**
 - **Sin regulador de velocidad.**

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{sd})	0,4172	3,1943	0,3247	Valor oscilando	Valor oscilando
e_q'	1,1452	1,0897	1,1426	Valor oscilando	Valor oscilando
delta(δ)	14,7321		22,1217	Valor oscilando	Valor oscilando
Potencia Activa(P)	0,88	0	1,2186	Valor oscilando	Valor oscilando
Par(T_e)	0,9108	0,3537	0,5398	Valor oscilando	Valor oscilando
Velocidad angular(ω_r)	1	1,0045	0,9952	Valor oscilando	Valor oscilando

Tabla 5.5: Resultados modelo Orden 3 (corto de duración 0.05sg.) sin regulador

Desde las figuras 5.10 hasta la 5.15 se verán las variables más significativas del modelo de orden 3 sin regulador de velocidad.

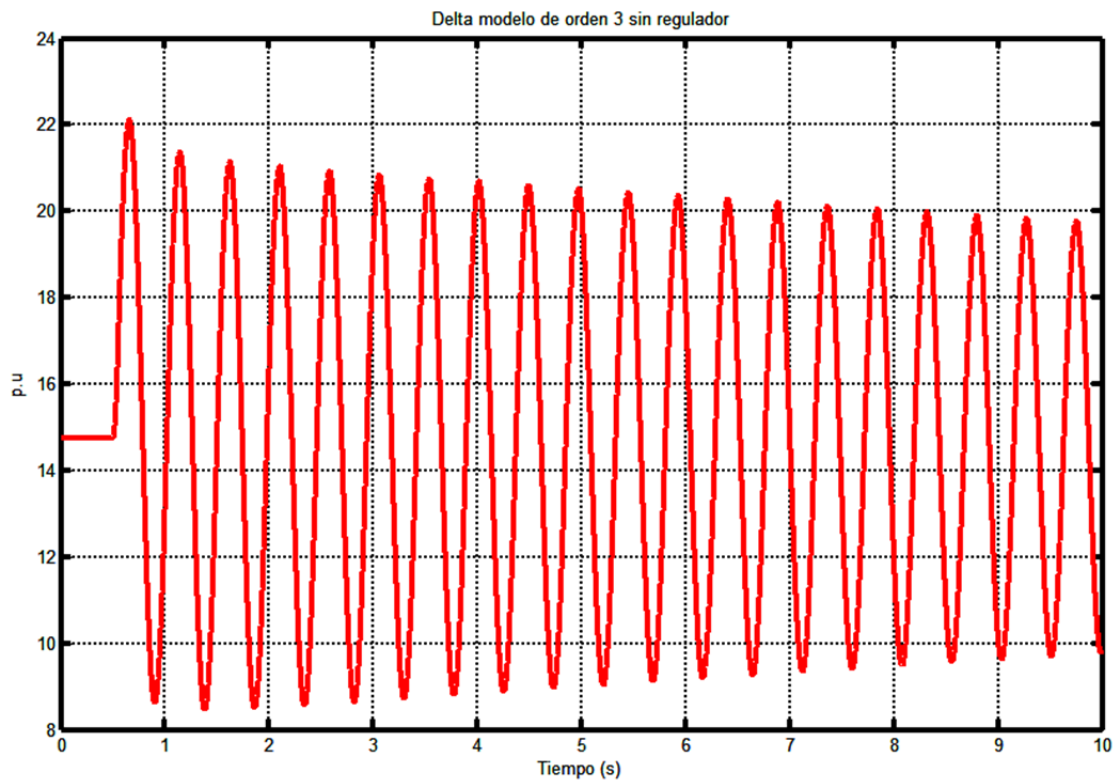


Figura 5.10: Ángulo de desfase sin regulador

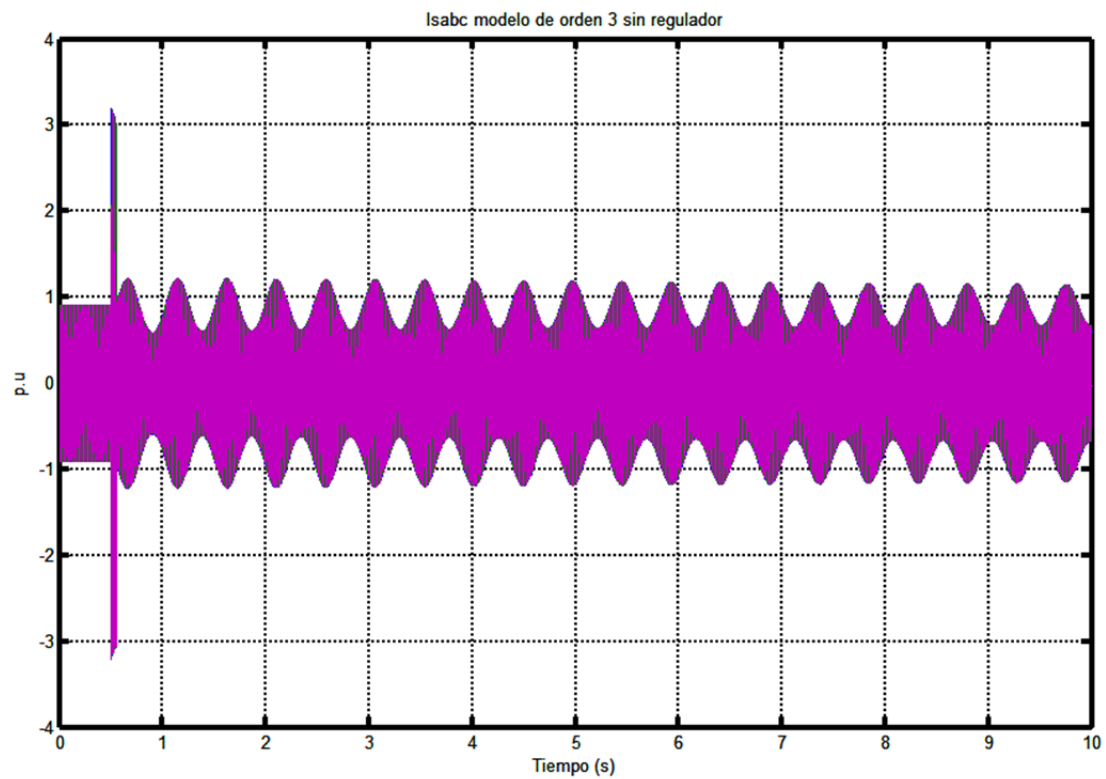


Figura 5.11: Intensidad del estator "abc" sin regulador

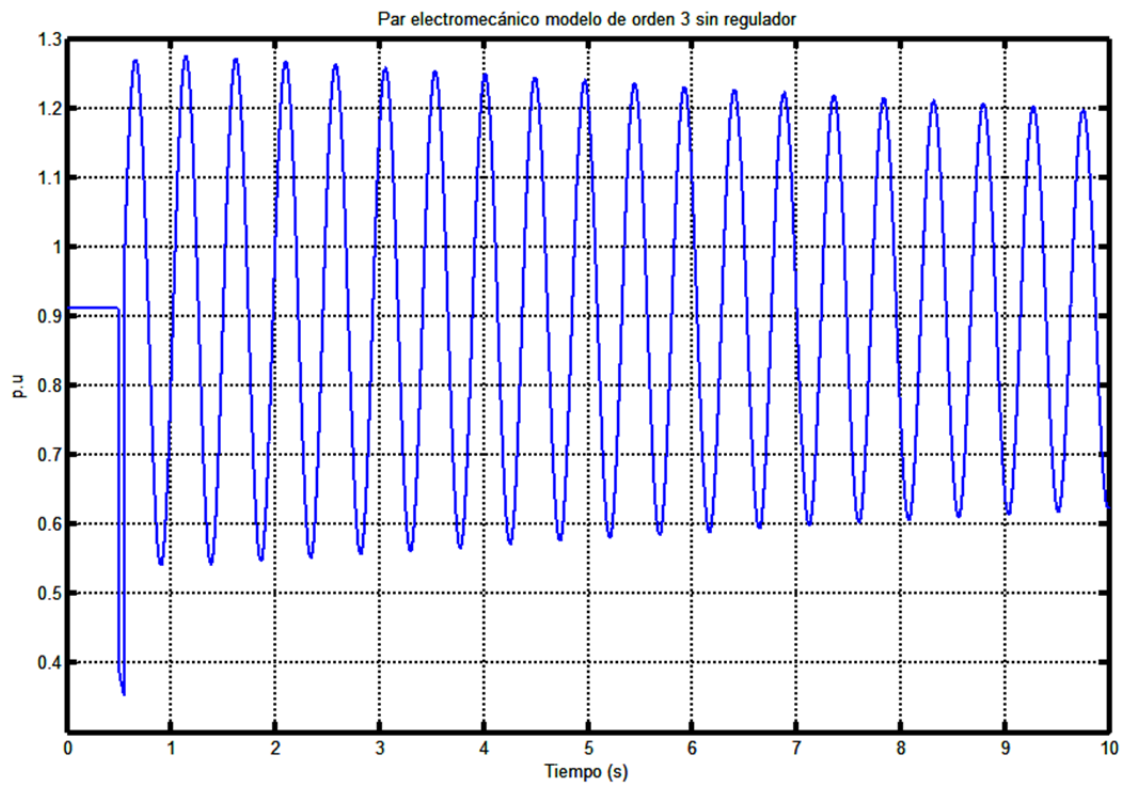


Figura 5.12: Par electromecánico sin regulador

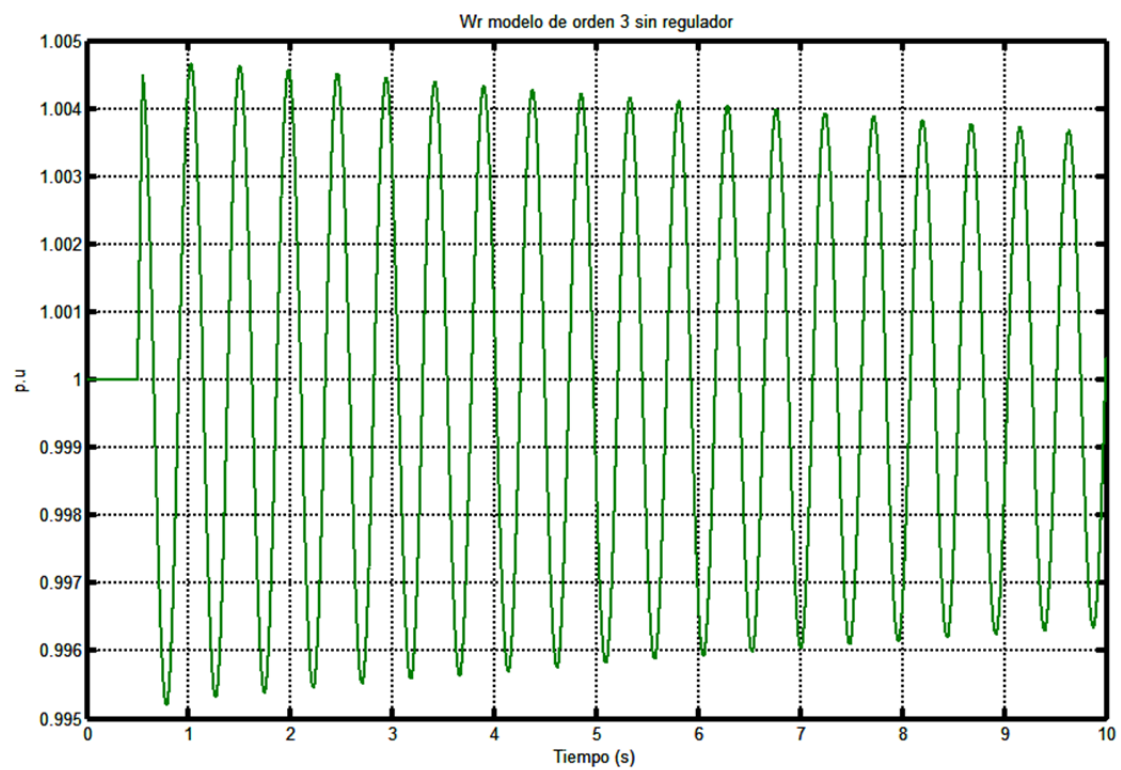


Figura 5.13: Velocidad angular sin regulador

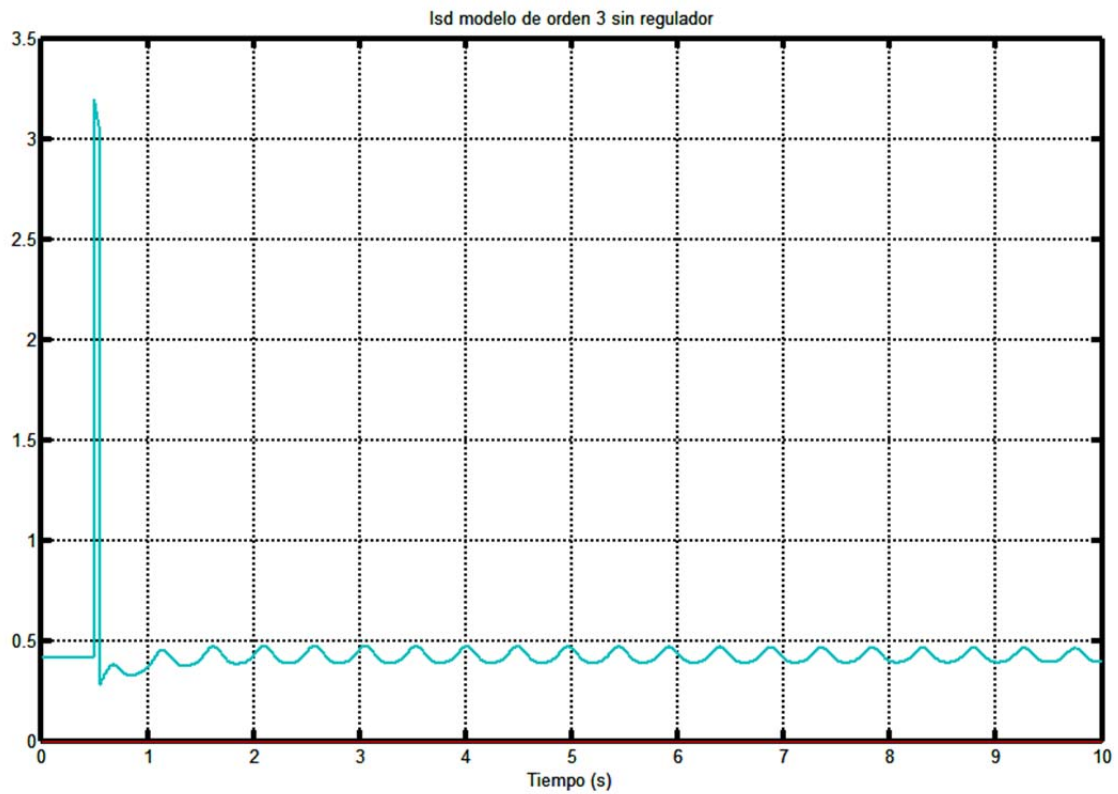


Figura 5.14: Intensidad del estator "d" sin regulador

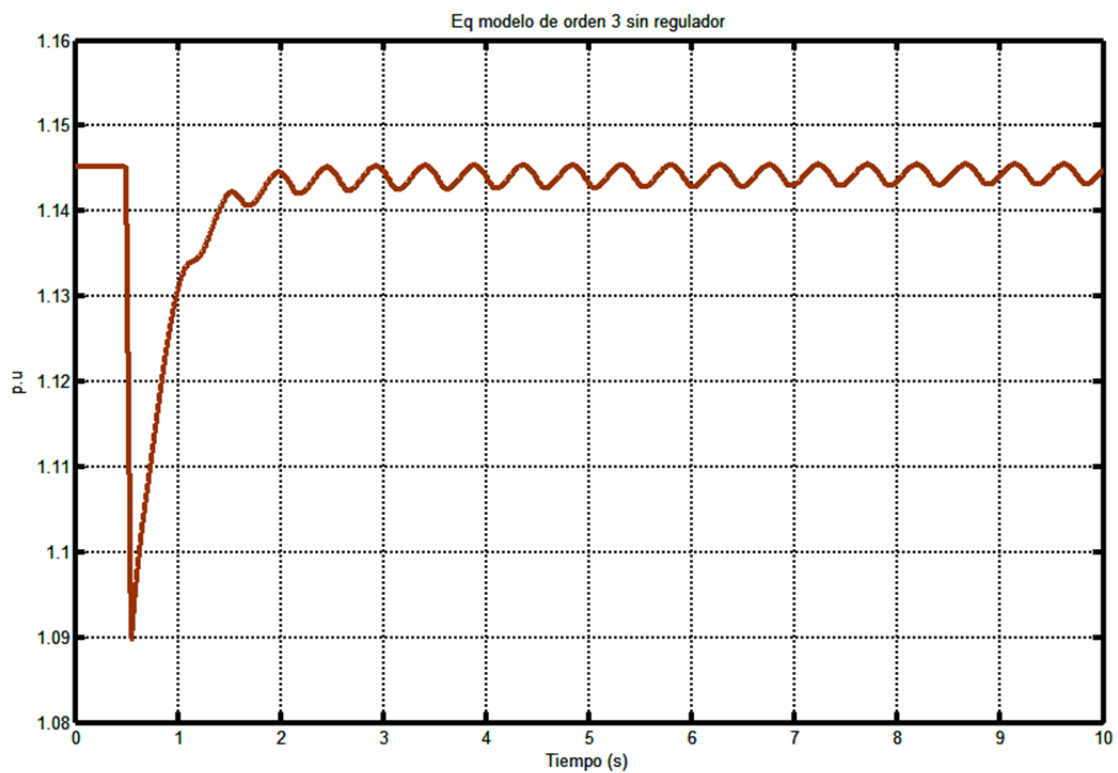


Figura 5.15: Tensión del estator "q" sin regulador

A diferencia del modelo anterior, cuando no se dispone del regulador de velocidad, en este modelo las variables tienden a regresar a su valor inicial aunque muy lentamente, debido a la regulación en la parte eléctrica simplemente de la tensión en el eje de cuadratura.

Este modelo al igual que el de orden 2 no es muy práctico porque en un sistema eléctrico no se puede permitir a una máquina síncrona generadora que tarde tanto en volver a sus valores iniciales. No obstante observar el cambio de un modelo a otro es muy práctico y significativo.

- Con regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,1943	0,328	0,4172	2,5
$e_{q'}$	1,1452	1,0897		1,1452	2
delta(δ)	14,7321		21,0636	14,7321	6,5
Potencia Activa(P)	0,88	0	1,1609	0,88	5,5
Par(T_e)	0,9108	0,3537	1,212	0,9108	6
Velocidad angular(ω_r)	1	1,0043	0,9961	1	6

Tabla 5.6: Resultados modelo Orden 3 (corto de duración 0.05sg.) con regulador

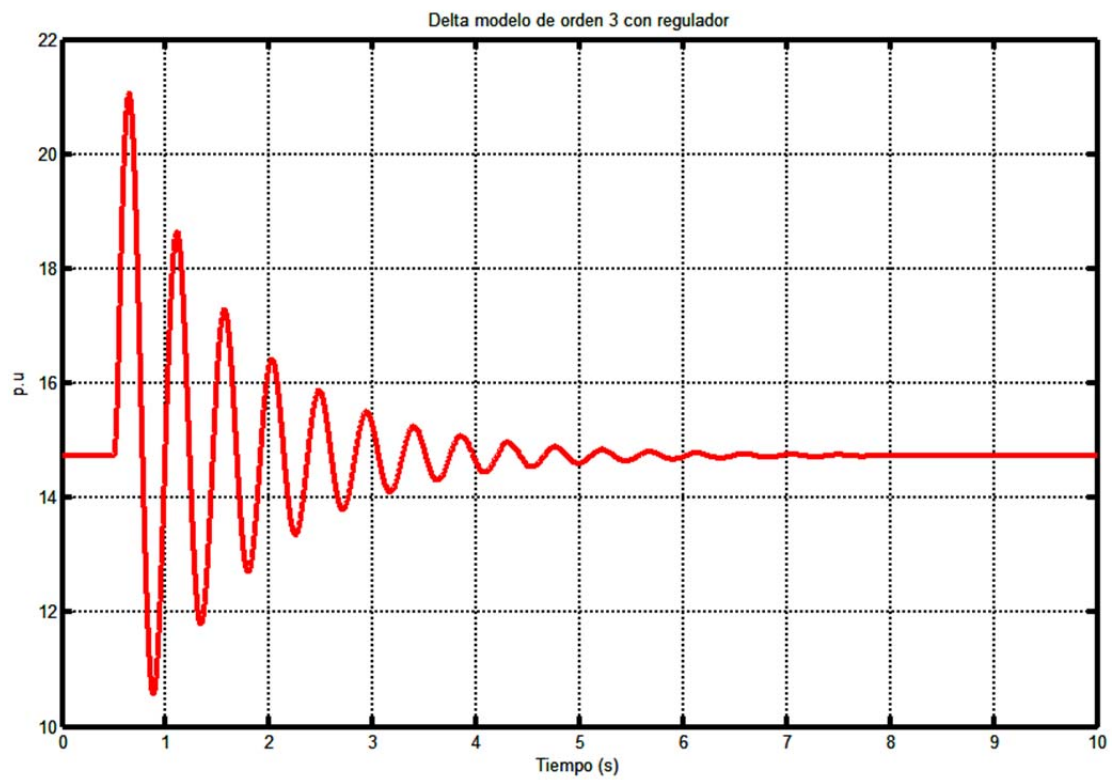


Figura 5.16: Ángulo de desfase con regulador

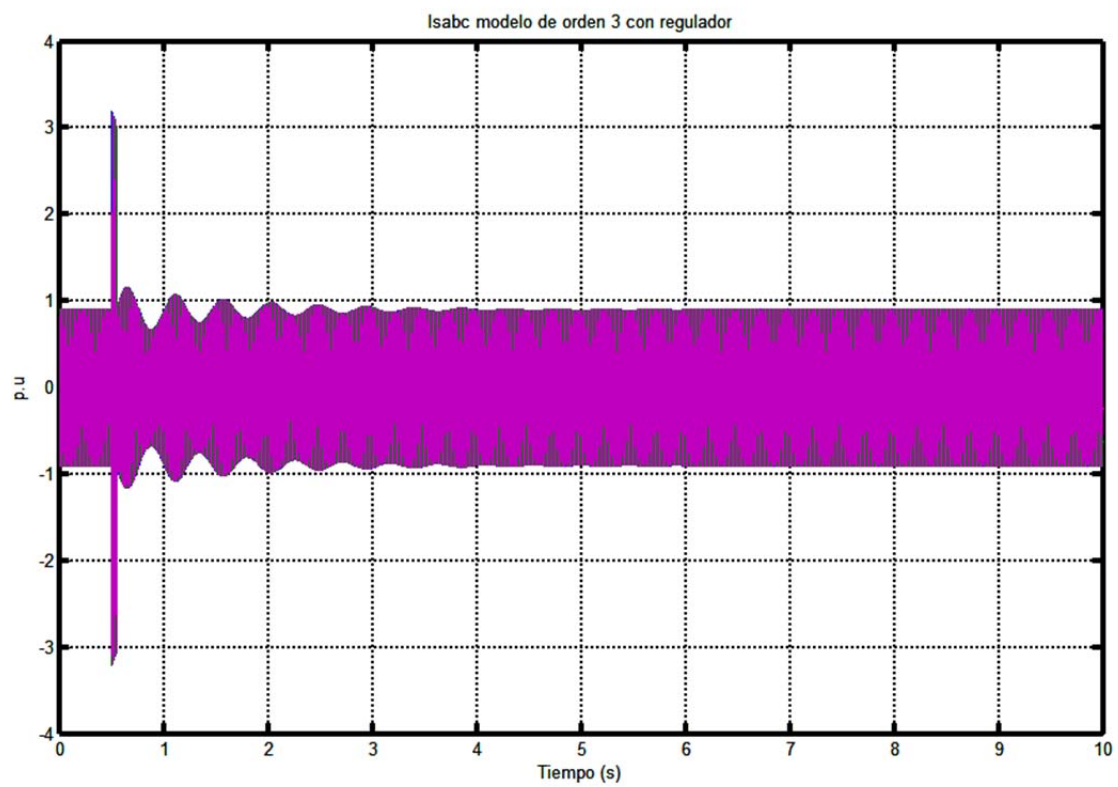


Figura 5.17: Intensidad del estator "abc" con regulador

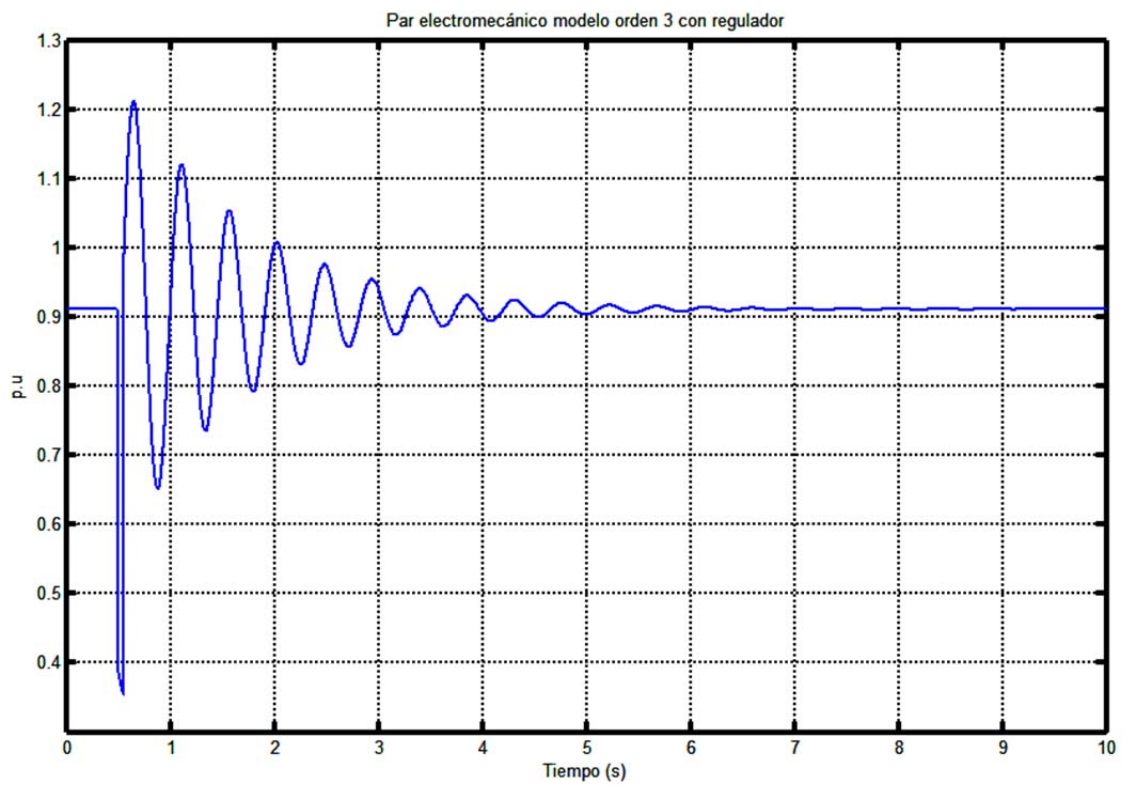


Figura 5.18: Par electromecánico con regulador

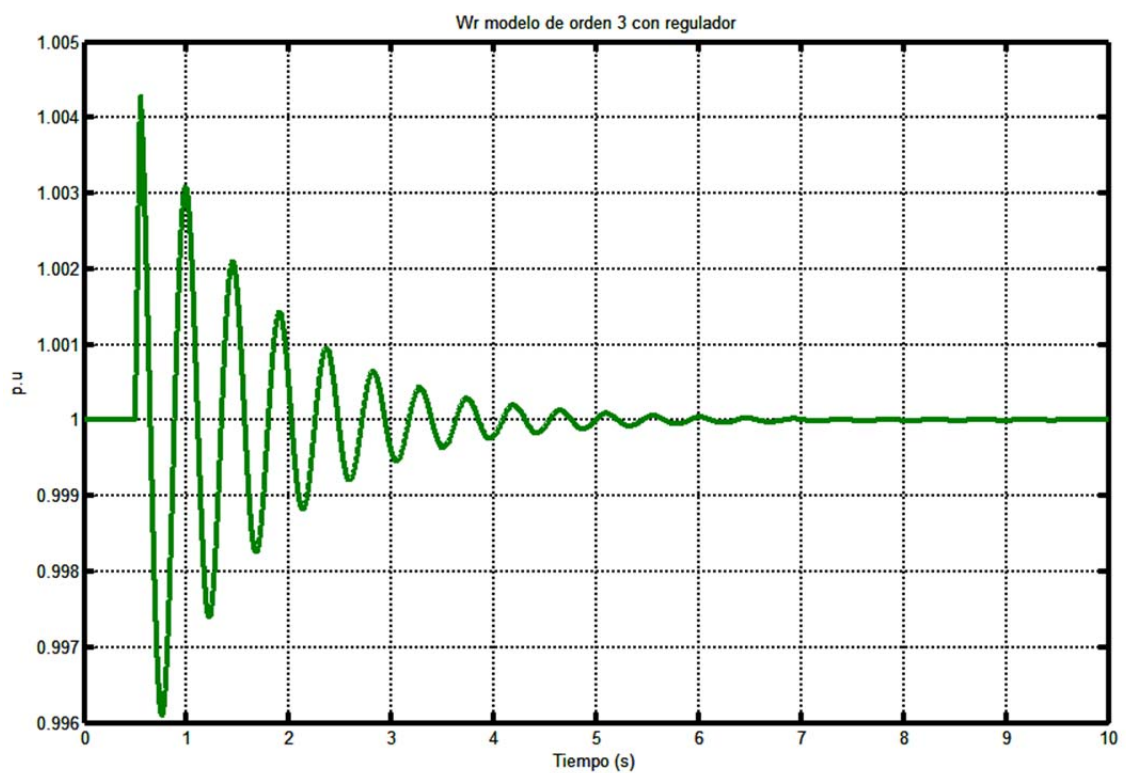


Figura 5.19: Velocidad angular con regulador

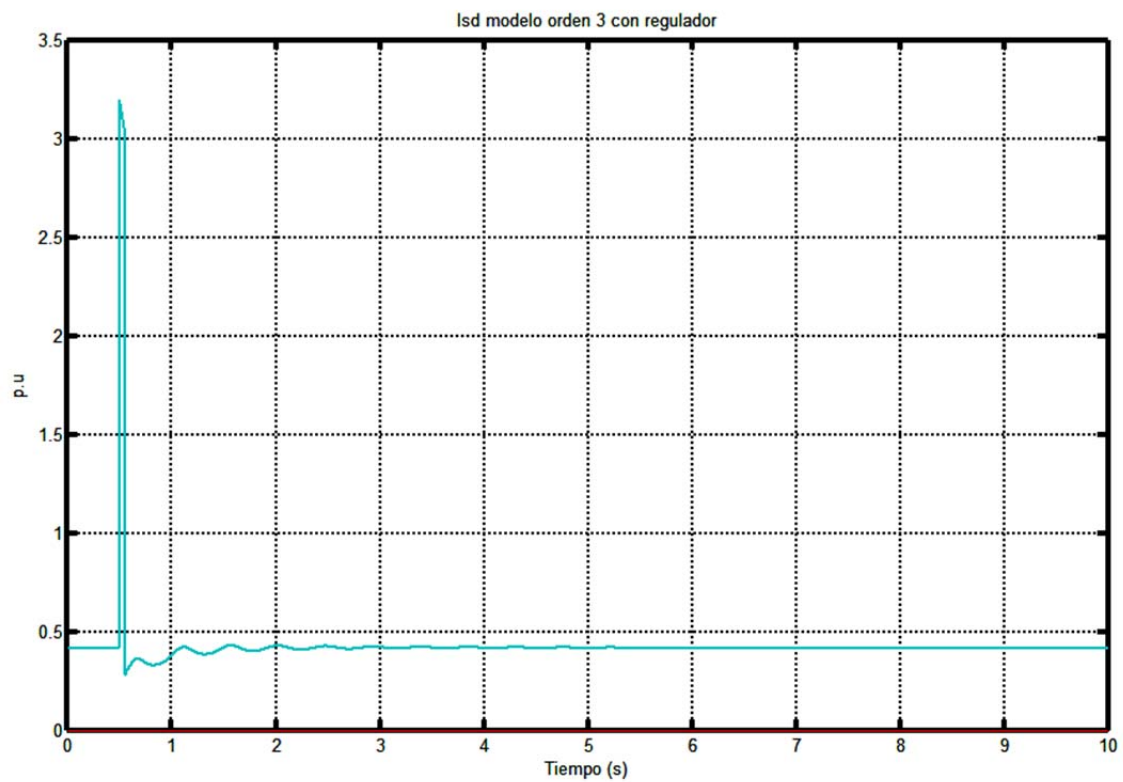


Figura 5.20: Intensidad del estator "d" con regulador

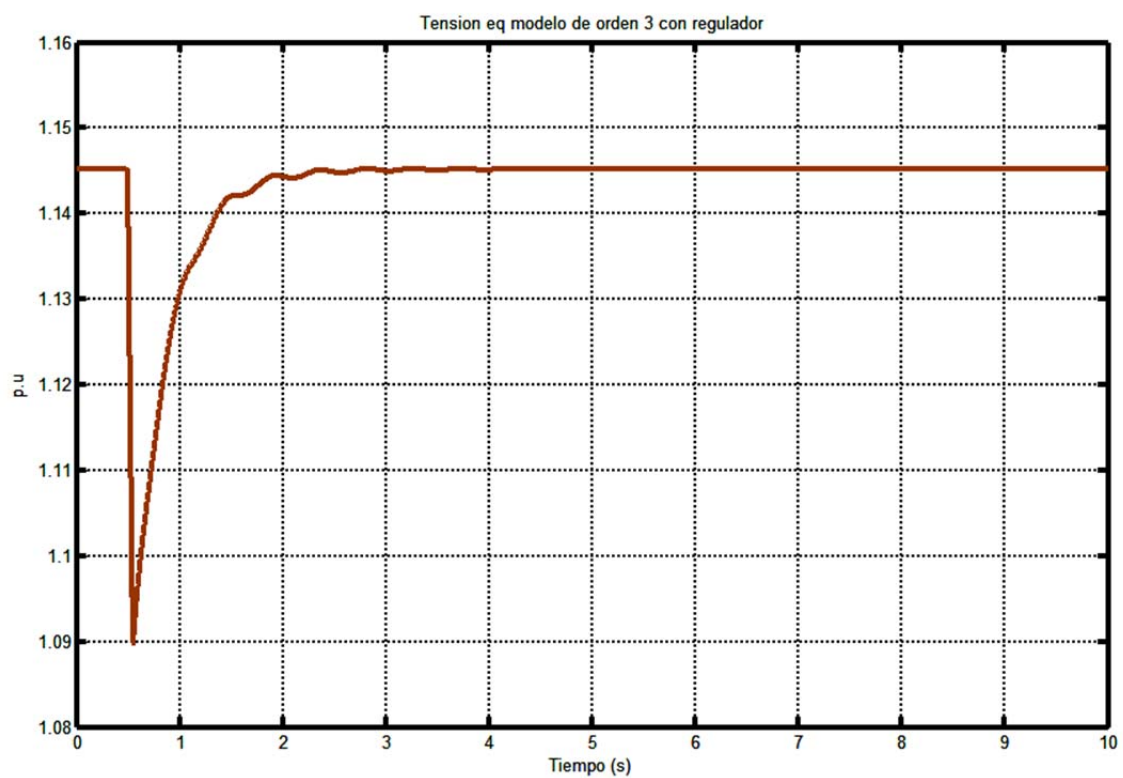


Figura 5.21: Tensión del estator "q" con regulador

La diferencia principal de regular este modelo a no regularle es, al igual que en el modelo clásico, la brevedad con la que el sistema se estabiliza. Si queremos comparar al modelo clásico con este modelo, ambos con regulador de velocidad, no se apreciará un cambio significativo, pero podemos ver una mejor estabilización y la obtención de un dato más como variable de estado como es la δ .

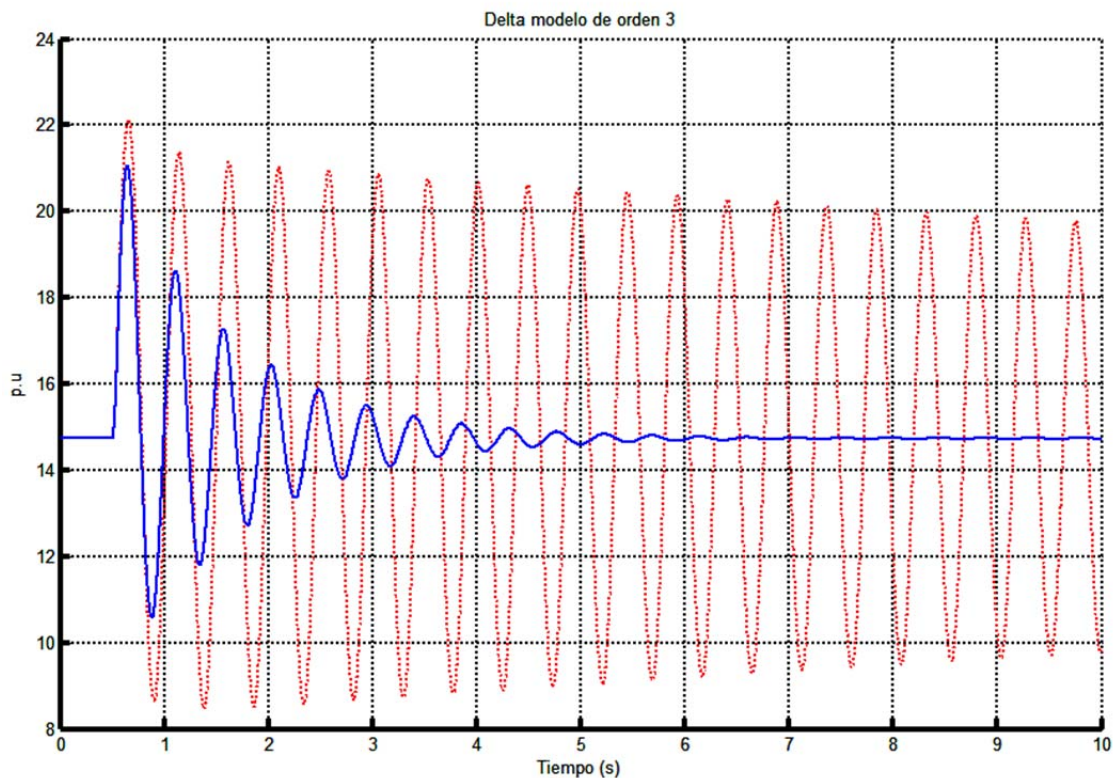


Figura 5.22: Ángulo delta

Se observa en la figura 5.20 un aumento considerable de la intensidad de la corriente en "d" hasta más de 3 p.u. en el cortocircuito, porque la intensidad en el caso de los cortocircuitos es la variable más afectada y aumenta en gran magnitud.

Al igual que ocurre en el modelo de orden 2 el ángulo delta de la figura 5.22 con el regulador consigue estabilizarse mientras que sin regulador oscila continuamente aunque disminuyendo poco a poco esas oscilaciones.



- Huevo de tensión máximo para que el sistema sea estable 0.32sg.
 - Sin regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,1943	4,3201	Valor oscilando	Valor oscilando
eq'	1,1452	0,901	0,5547	Valor oscilando	Valor oscilando
delta(δ)	14,7321		151,97	Valor oscilando	Valor oscilando
Potencia Activa(P)	0,88	0	-1,7035	Valor oscilando	Valor oscilando
Par(T_e)	0,9108	0,2417	-1,5901	Valor oscilando	Valor oscilando
Velocidad angular(W_r)	1	1,0325	0,9638	Valor oscilando	Valor oscilando

Tabla 5.7: Resultados modelo Orden 3 (corto de duración 0.32sg.) sin regulador

- Con regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,1943	2,164	0,4061	4
eq'	1,1452	0,9009	0,8785	1,1478	3
delta(δ)	14,7321		89,91	11,5617	6
Potencia Activa(P)	0,88	0	-1,7802	0,7078	6
Par(T_e)	0,9108	0,2417	-1,6516	0,7294	6,5
Velocidad angular(W_r)	1	1,0193	0,9614	1	6

Tabla 5.8: Resultados modelo Orden 3 (corto de duración 0.32sg.) con regulador

En el caso de este modelo en los rectángulos remarcados vacíos del valor más desfavorable dentro del tiempo del cortocircuito, ocurre lo mismo que en el modelo anterior, el valor va aumentando en todo momento. Respecto al valor más



desfavorable cuando el cortocircuito ya está restablecido lo que ocurre es que el valor va recuperándose hasta llegar a su valor final, sin oscilar, lo cual no existe un punto en sí sino que su pendiente va cambiando de más a menos desde el punto más desfavorable obtenido en el cortocircuito.

Cabe destacar que en este caso el modelo me permite menos tiempo de cortocircuito sin regulador llegando a tiempo máximo de cortocircuito para que el sistema sea estable hasta los 0.32sg., 0.05sg. menos que en el modelo clásico. Es debido a que en este modelo el sistema se nos desequilibra por la variable e_q' , la cual no nos encontramos en el modelo clásico.

3. Modelo de dos ejes (Orden 4)

En este modelo los ejes utilizados son dos ejes; el eje de cuadratura (q) y el eje directo (d). El resultado de las ecuaciones magnéticas o eléctricas tienen solo dos variables de estado, las relacionadas con las tensiones en el estator en dichos ejes (e_q' y e_d'). Una consideración que tendremos en cuenta es:

$$T_{d0}'' \approx T_{q0}'' \approx 0$$

Este modelo es el más utilizado comúnmente en el análisis de estabilidad en sistemas de potencia porque además de ser simple tiene una buena precisión.

- **Datos del estudio:**
 - **Hueco de tensión 0.05sg.**
 - **Sin regulador de velocidad.**

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,2129	0,3315	0,4172	2,5
ed'	0,0774	0,0374	0,1059	0,0774	3
eq'	1,1452	1,0896		1,1452	0,8
delta(δ)	14,7321		21,0673	14,7321	8
Potencia Activa(P)	0,88	0	1,1701	0,88	7
Par(T_e)	0,9108	0,3536	1,222	0,9108	8
Velocidad angular(W_r)	1	1,0045	0,9962	1	8,5

Tabla 5.9: Resultados modelo Orden 4 (corto de duración 0.05sg.) sin regulador

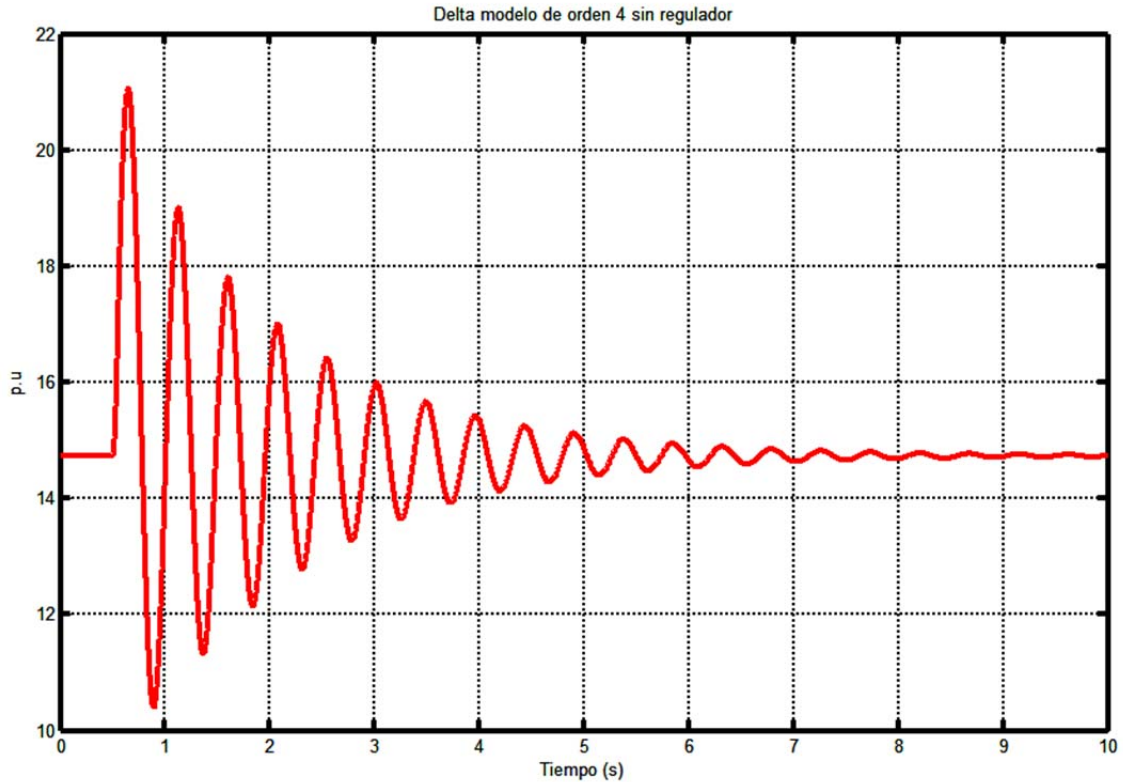


Figura 5.23: Ángulo de desfase sin regulador

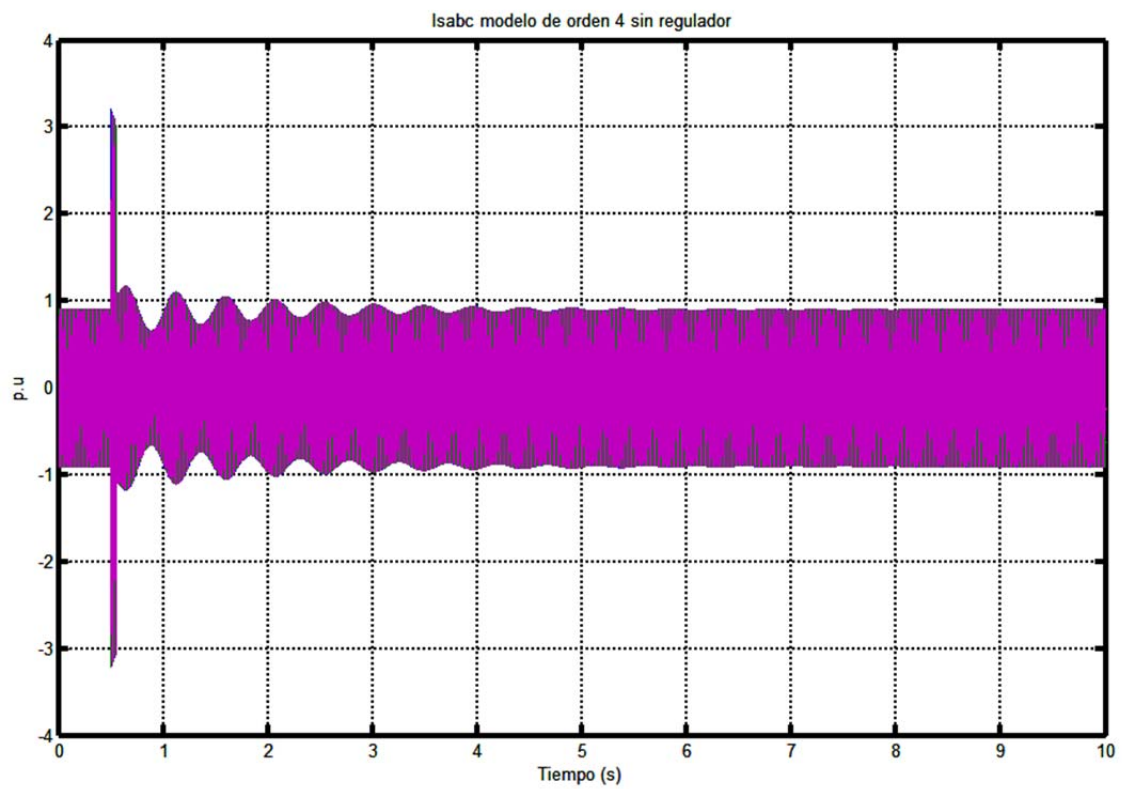


Figura 5.24: Intensidad del estator "abc" sin regulador

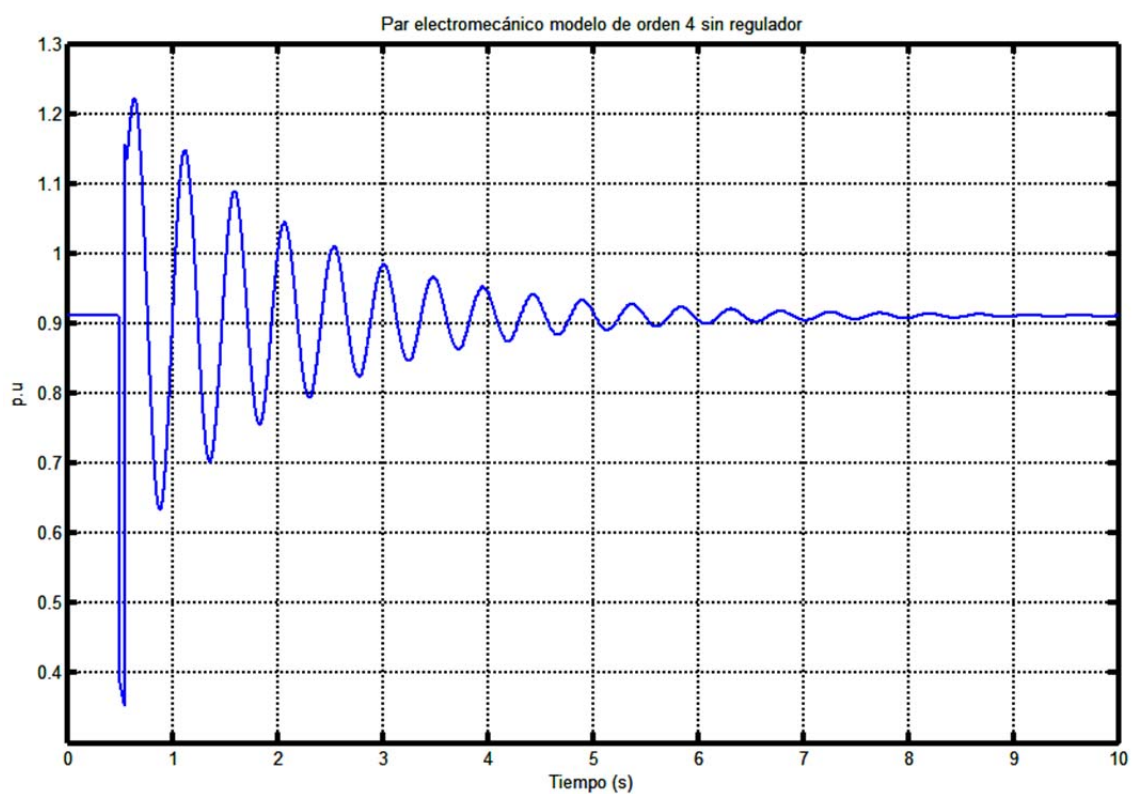


Figura 5.25: Par electromecánico sin regulador

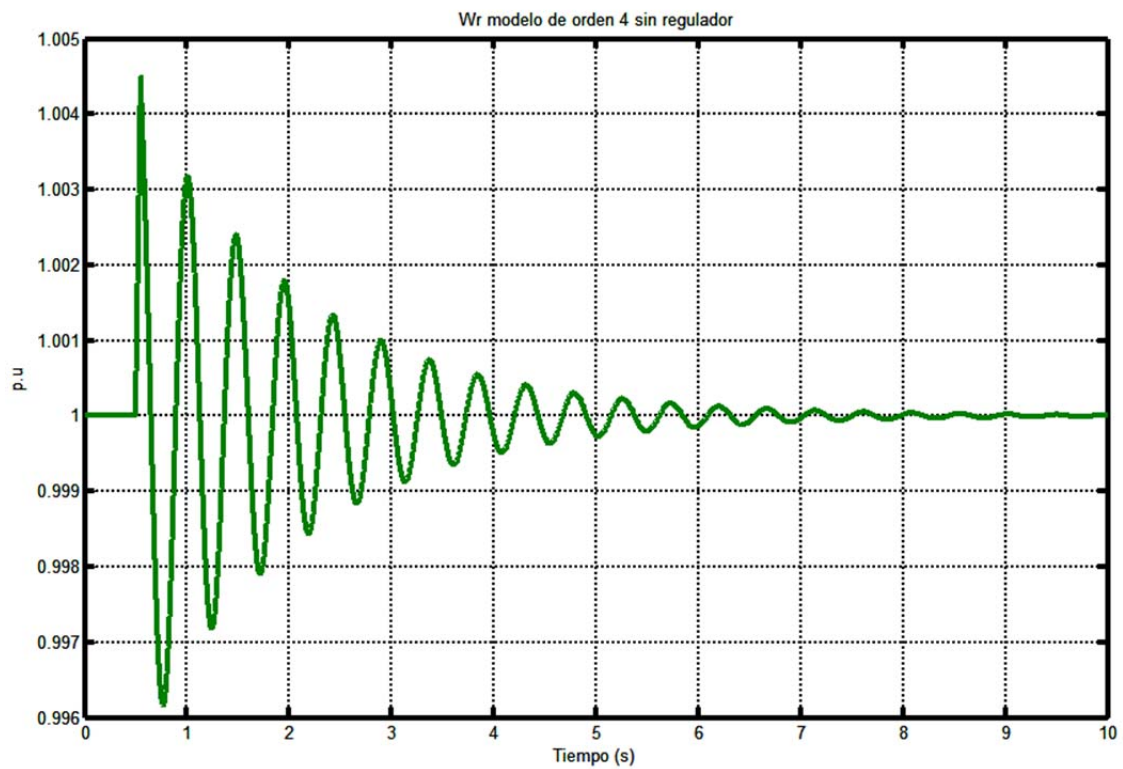


Figura 5.26: Velocidad angular sin regulador

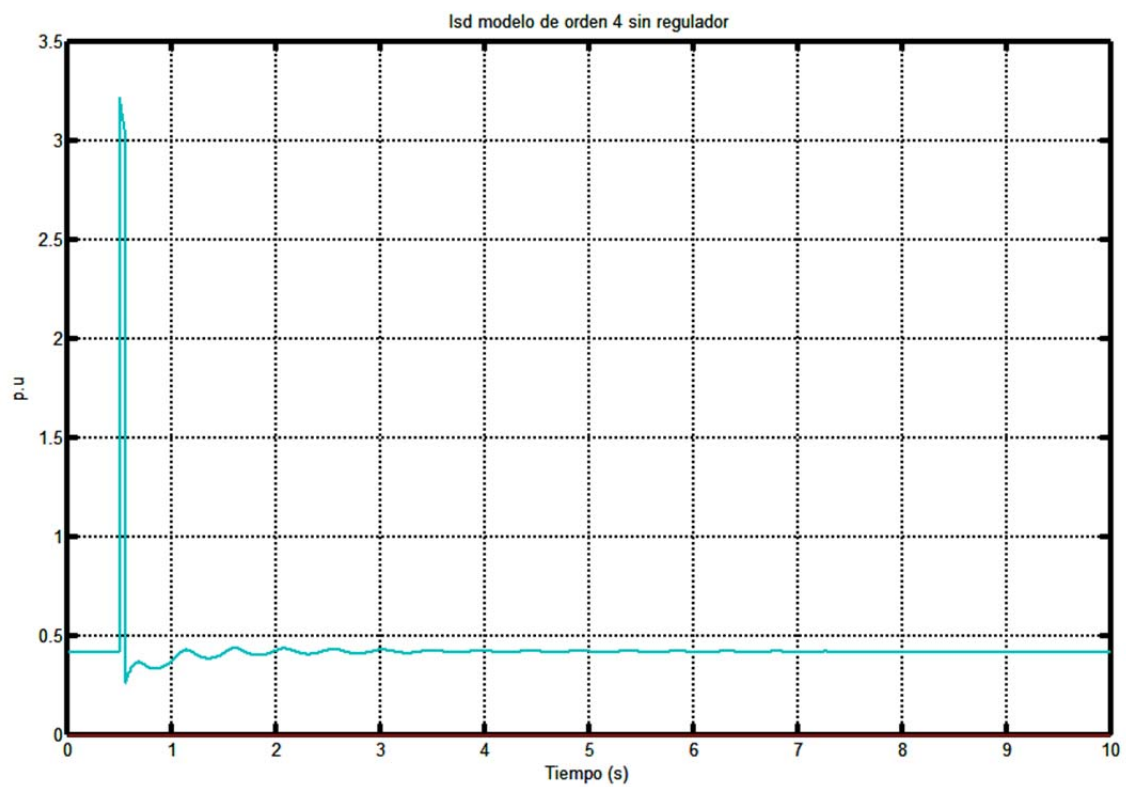


Figura 5.27: Intensidad del estator "d" sin regulador

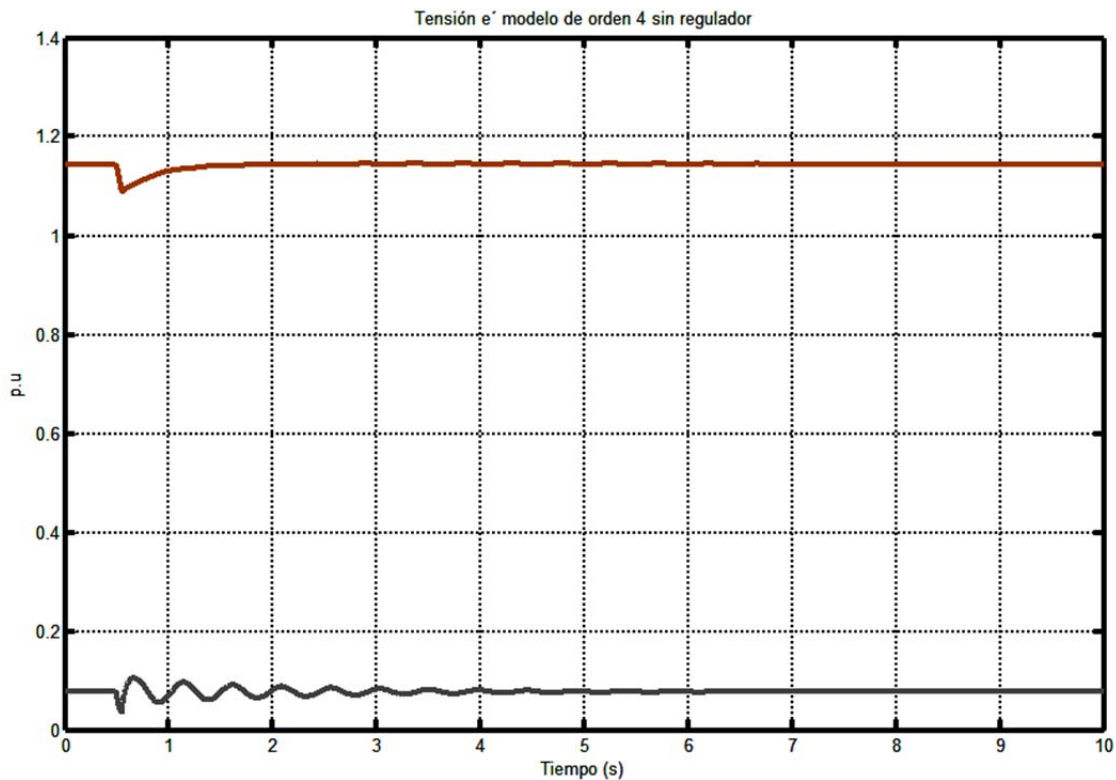


Figura 5.28: Tensión del estator "e" sin regulador

En la figura 5.28 se observa que ambas tensiones consiguen estabilizarse, tanto la e_q' (expresada en la parte superior), como la e_d' (expresada en la parte inferior de la tabla).

Como bien se observa en los datos la tabla 5.9 y en las gráficas de este modelo sin regulador mejora claramente los resultados tanto del modelo clásico como el modelo de un eje, ya que la regulación eléctrica en este modelo se realiza sobre las tensiones de los dos ejes. El pico de las intensidades sigue siendo alto pero eso es inevitable en este tipo de cortocircuitos.

▪ Con regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,417	3,2129		0,417	0,7
ed'	0,0774	0,0609	0,0814	0,0774	0,5
eq'	1,1452	1,1333		1,1452	0,5
delta(δ)	14,7321		15,641	14,7321	3,5
Potencia Activa(P)	0,88	0	0,9219	0,88	2
Par(T_e)	0,9108	0,3829	0,9549	0,9108	2,5
Velocidad angular(W_r)	1	1,0009	0,9995	1	3,5

Tabla 5.10: Resultados modelo Orden 4 (corto de duración 0.05sg.) con regulador

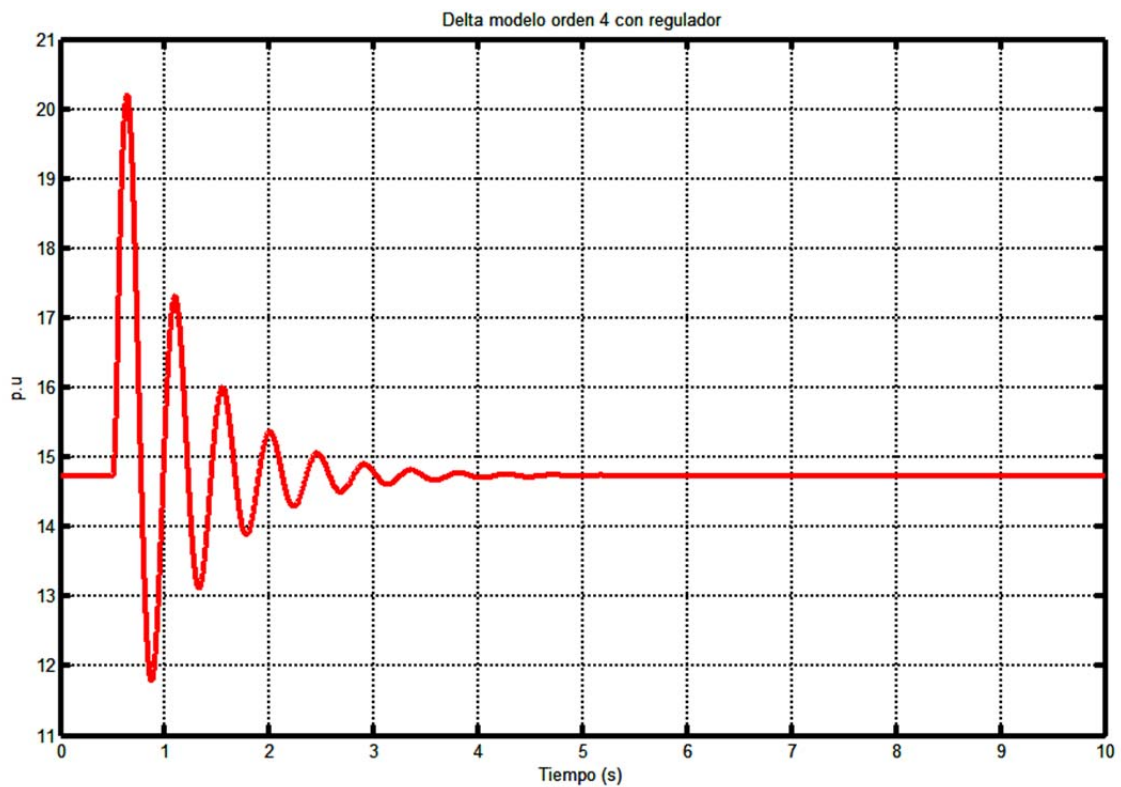


Figura 5.29: Ángulo de desfase con regulador

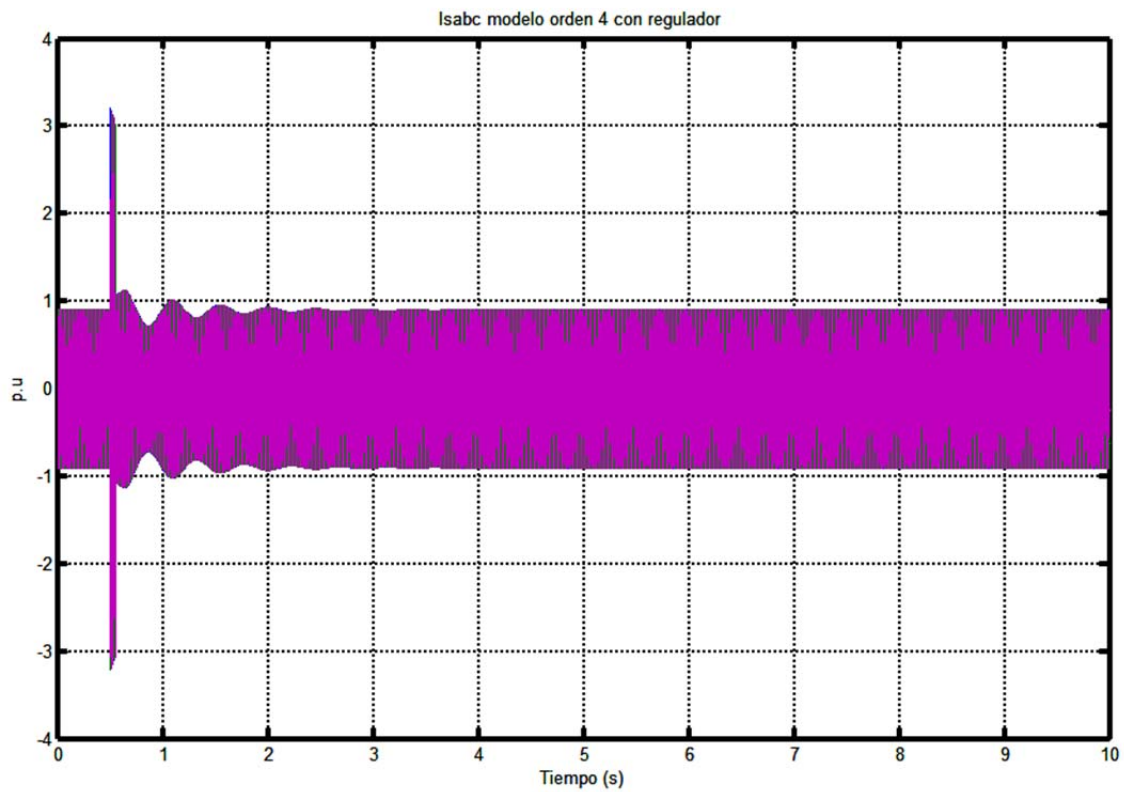


Figura 5.30: Intensidad del estator "abc" con regulador

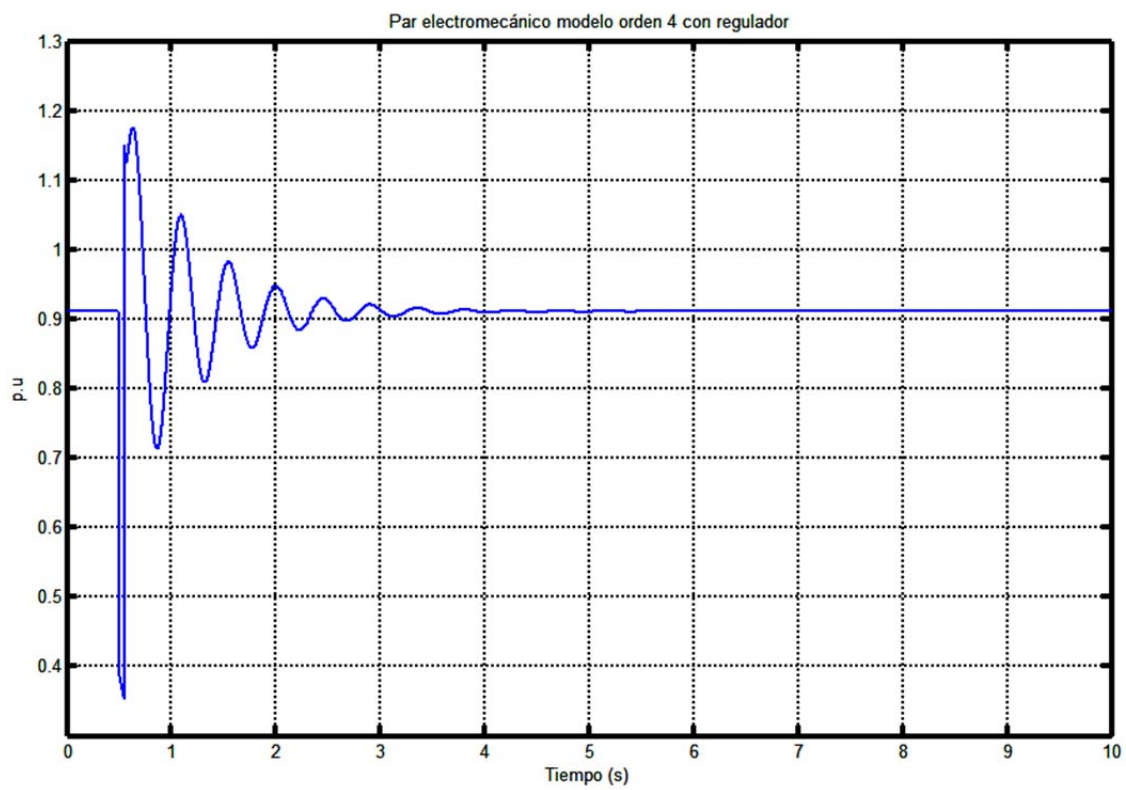


Figura 5.31: Par electromecánico con regulador

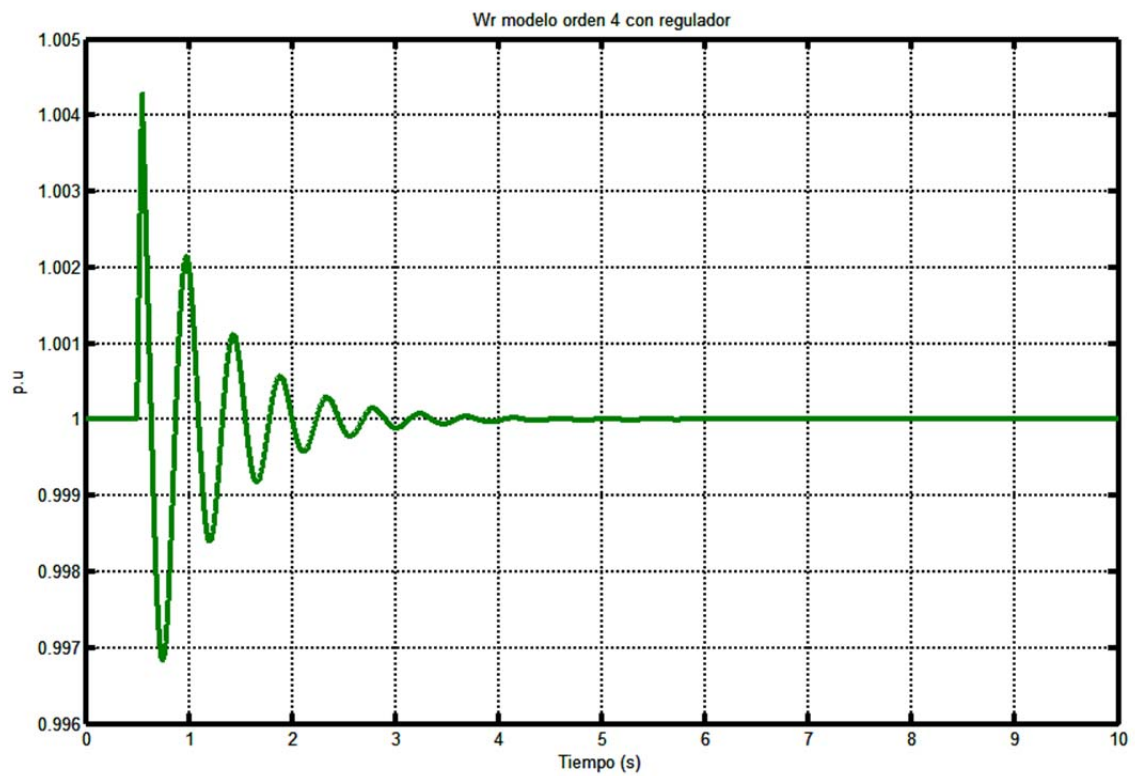


Figura 5.32: Velocidad angular con regulador

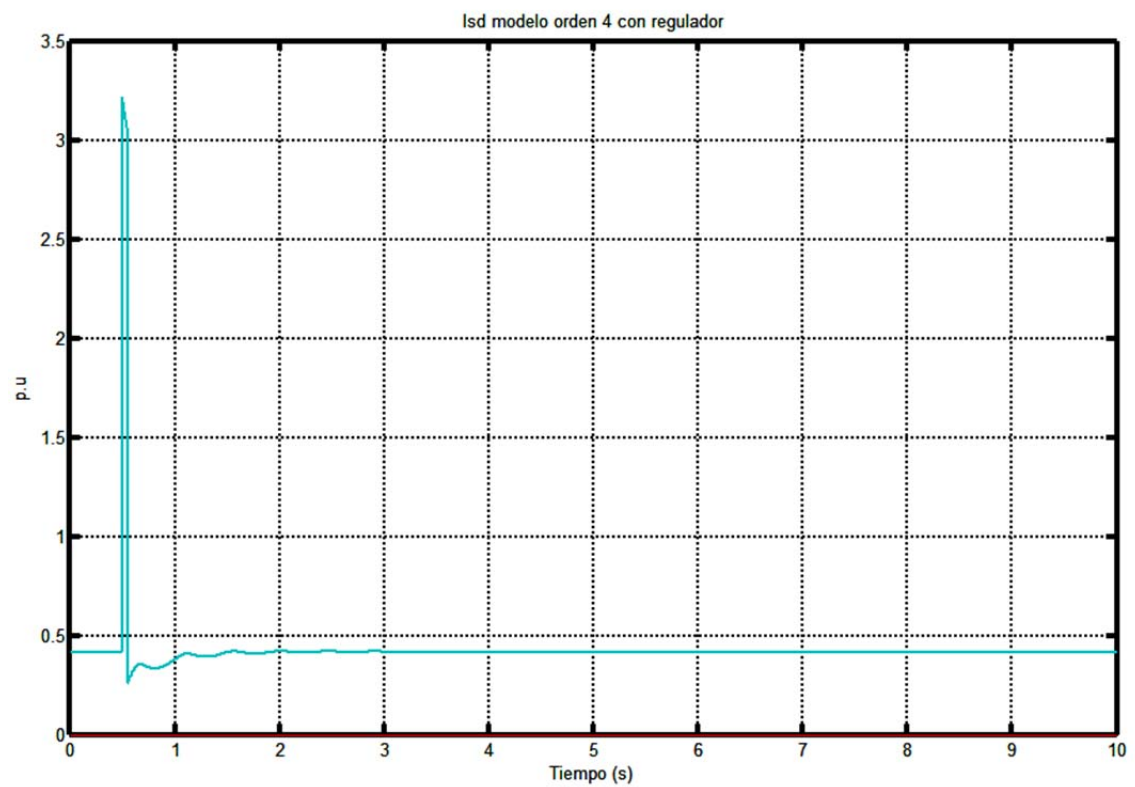


Figura 5.33: Intensidad del estator "d" con regulador

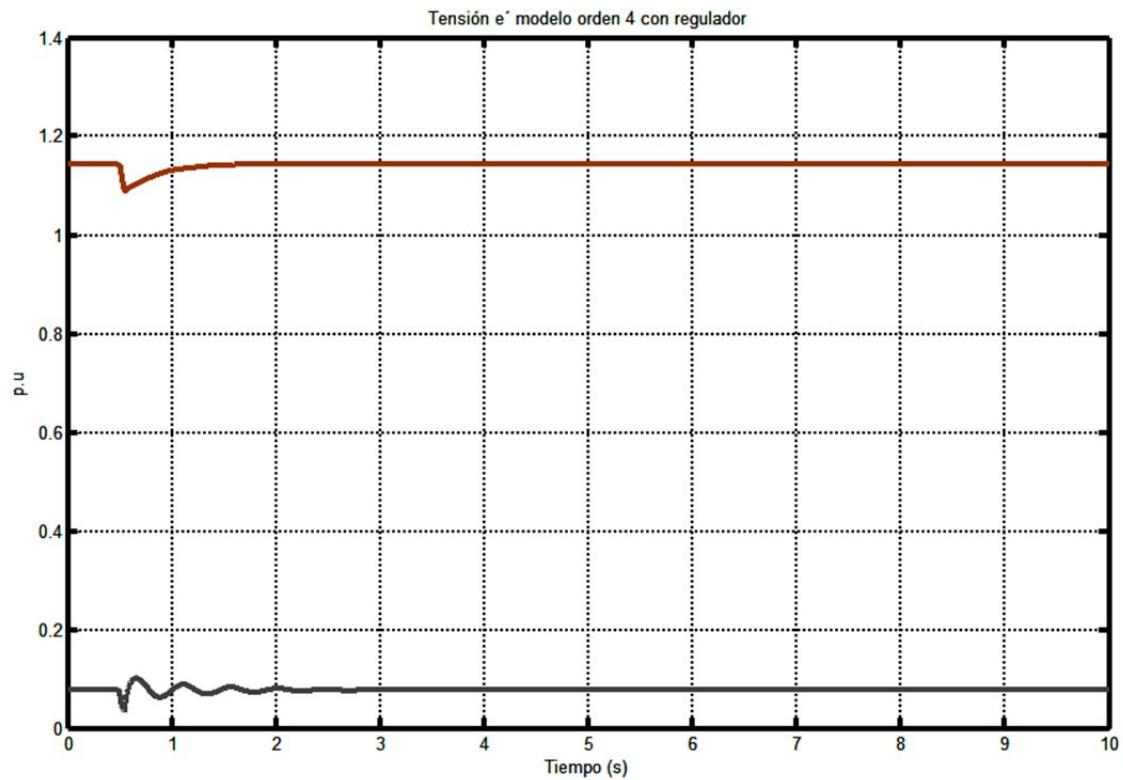


Figura 5.34: Tensión del estator "e" con regulador

Se observa en este ensayo que el modelo de orden 4 con regulador de velocidad es muy apropiado para cualquier máquina síncrona a utilizar debido a la rápida estabilidad (aproximadamente 3.5sg. como máximo) y a la llegada al valor final idéntico al logrado en régimen permanente.

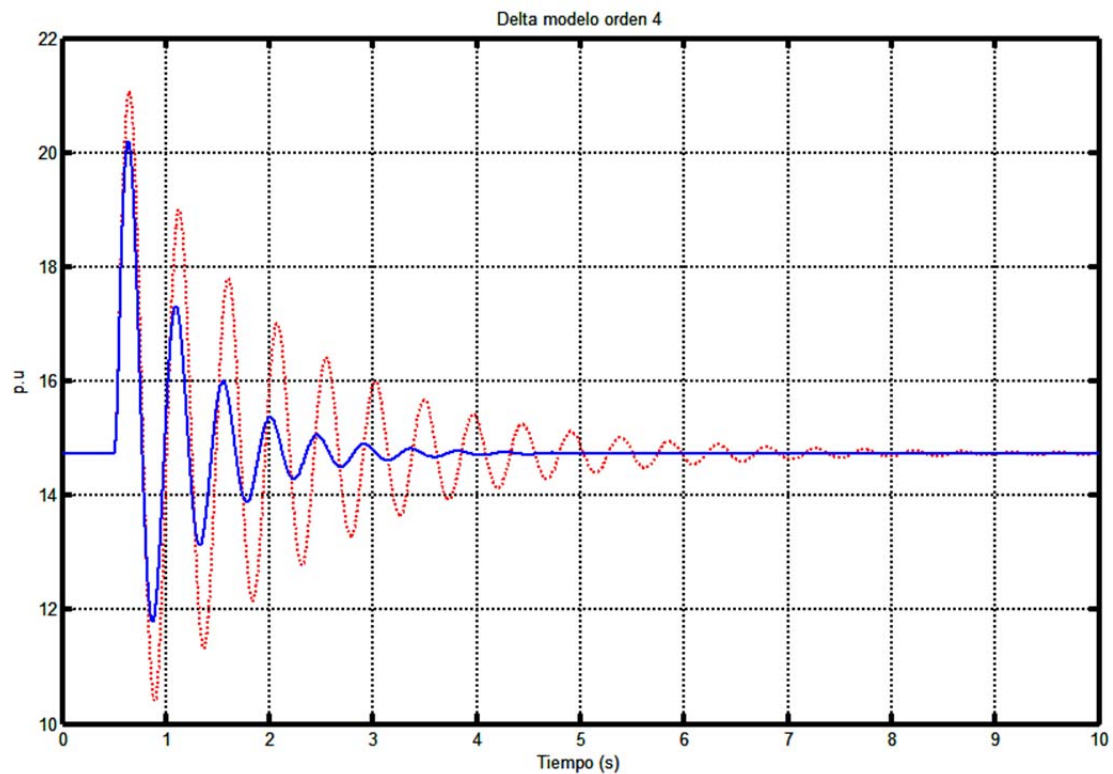


Figura 5.35: Ángulo de desfase modelo 4

En la figura 5.35, la señal que tiene regulador de velocidad consigue tener tiempo de amortiguamiento bastante menor, aun así, a diferencia de lo ocurrido en el modelo de orden 2 la señal sin regulador también consigue llegar al valor inicial.

- Hueco de tensión máximo para que el sistema sea estable 0.31sg.
 - Sin regulador de velocidad.



	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	3,2129	3,9553	1,4172	5,5
ed'	0,0774	0,0277	-0,1736	0,0774	7
eq'	1,1452	0,905	0,7117	1,1452	3,5
delta(δ)	14,7321		134,38	14,7317	9
Potencia Activa(P)	0,88	0	-1,8178	0,88	9,5
Par(T_e)	0,9108	0,2441	-1,6676	0,9108	10
Velocidad angular(W_r)	1	1,0314	0,9573	1	9,5

Tabla 5.11: Resultados modelo Orden 4 (corto de duración 0.31sg.) sin regulador

▪ Con regulador de velocidad.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,417	3,2129	1,975	0,4083	2,5
ed'	0,0774	0,0277	0,3006	0,0656	3
eq'	1,1452		0,8905	1,1472	2
delta(δ)	14,7321		85,783	12,3329	3,5
Potencia Activa(P)	0,88	0	-1,4612	0,7502	4
Par(T_e)	0,9108	0,2442	-1,375	0,7739	3,5
Velocidad angular(W_r)	1	1,0191	0,9641	1	3,5

Tabla 5.12: Resultados modelo Orden 4 (corto de duración 0.31sg.) con regulador



Sobre los recuadros vacíos, en este modelo ocurre igual que en los anteriores como bien se ven en las diferentes gráficas de cada modelo.

Como ocurre en el modelo de orden 3 respecto al de orden 2 el cortocircuito máximo que nos permite la máquina para que sea estable se reduce, aunque en bajas proporciones, porque el límite de estabilidad de este modelo ahora lo marca la tensión e_d' .

4. Modelo completo (Orden 8)

En este apartado se anotarán los resultados más significativos a la hora de realizar las comparaciones con los otros modelos. La prueba se realizará al igual que las anteriores con un cortocircuito trifásico equilibrado iniciado en 0.5sg. y de 0.05sg. de duración.

Este modelo es el modelo más completo, donde disponemos de devanados de amortiguamiento y todas las variables de estado posibles; entre ellas están todos los flujos y las tensiones del estator (todos ellos en los nuevos ejes "d" y "q").

No se utilizará regulador de velocidad manual y se investigará la duración de cortocircuito máxima para que el sistema sea estable.

- **Datos del estudio:**
 - **Hueco de tensión 0.05sg.**

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	10,8429	-5,8435	0,4172	1
delta(δ)	14,7321		26,752	14,7321	5,5
Potencia Activa(P)	0,88	0	-3,7295	0,88	3
Par(T_e)	0,9108	7,6063	-2,1178	0,9108	3
Velocidad angular(ω_r)	1	0,991	1,0091	1	5

Tabla 5.13: Resultados modelo Orden 8 (corto de duración 0.05sg.)

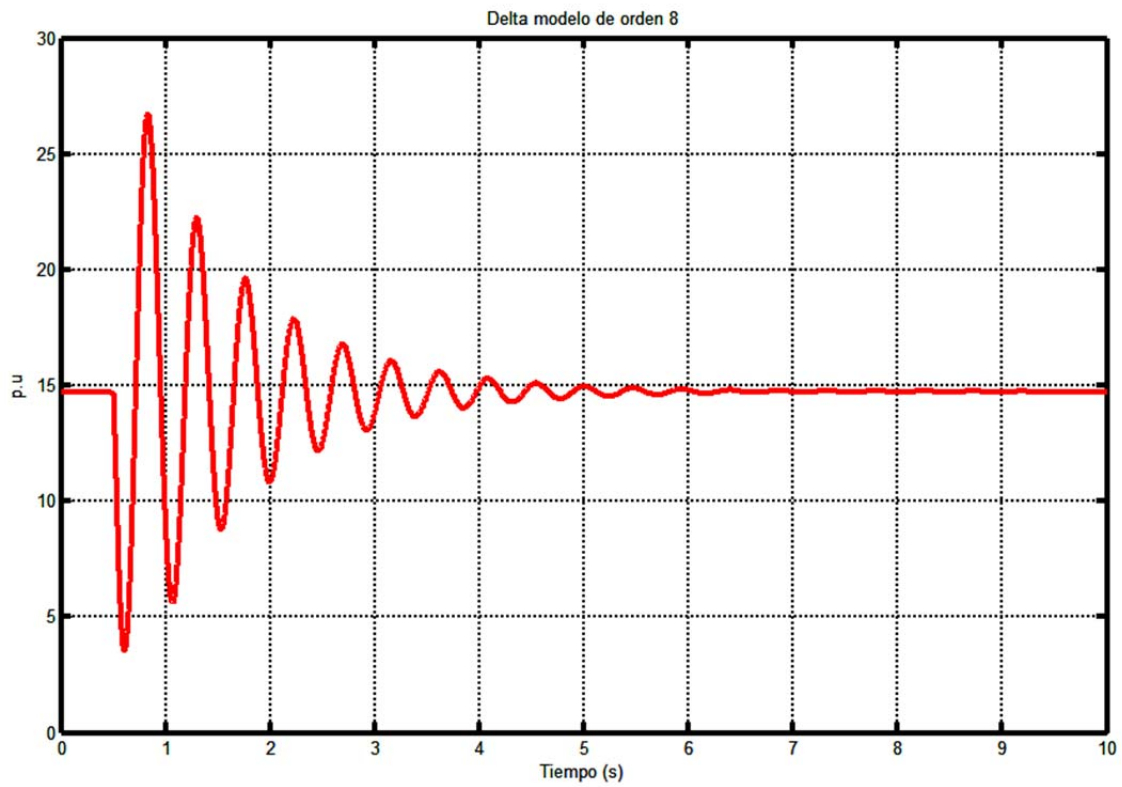


Figura 5.36: Ángulo de desfase sin regulador

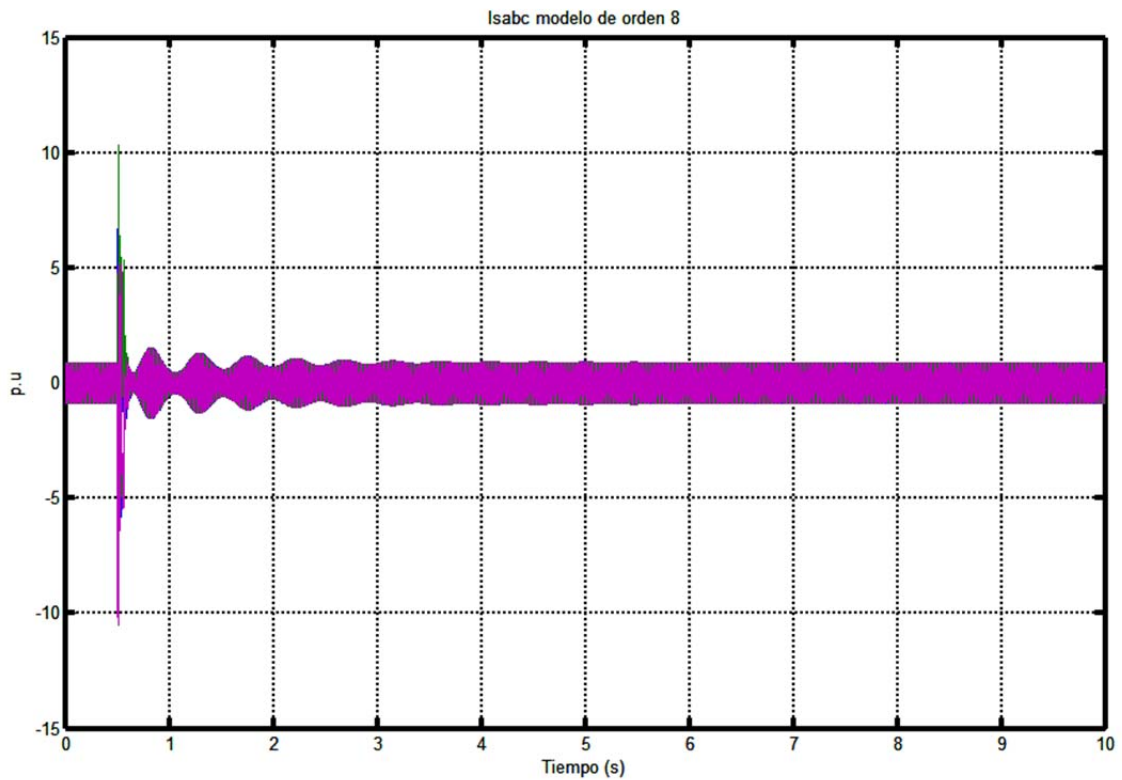


Figura 5.37: Intensidad del estator "abc" sin regulador

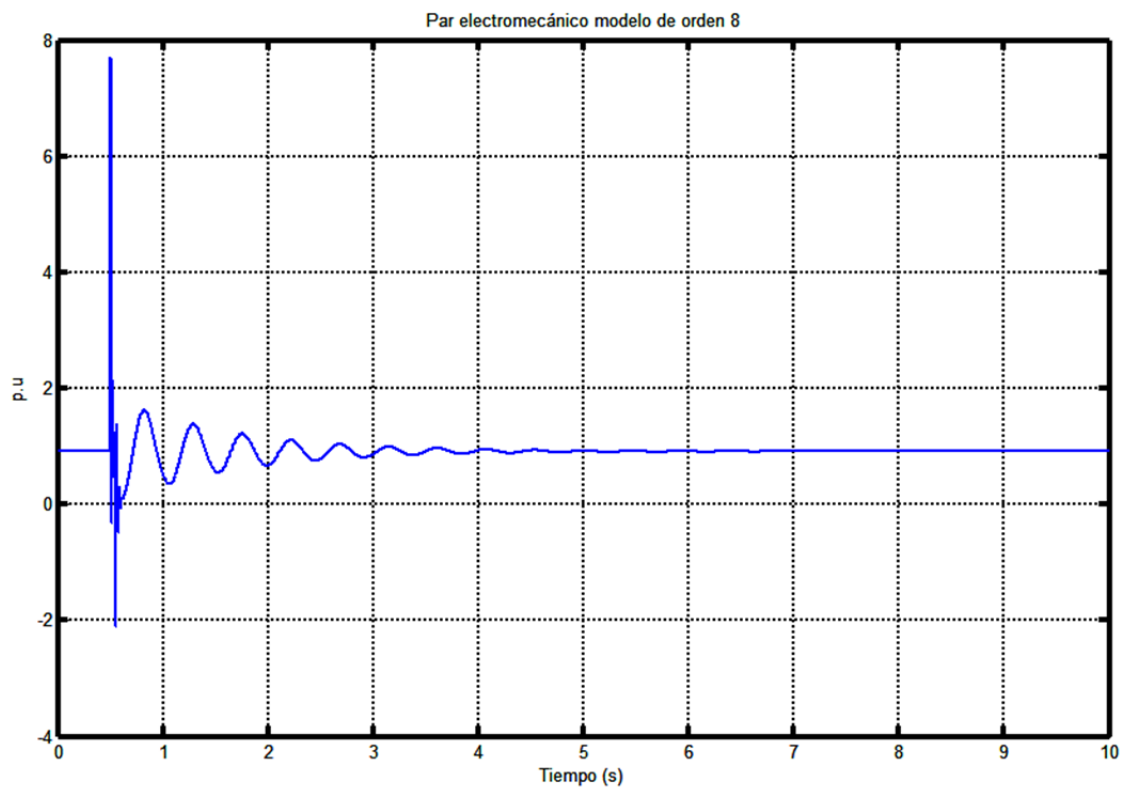


Figura 5.38: Par electromecánico sin regulador

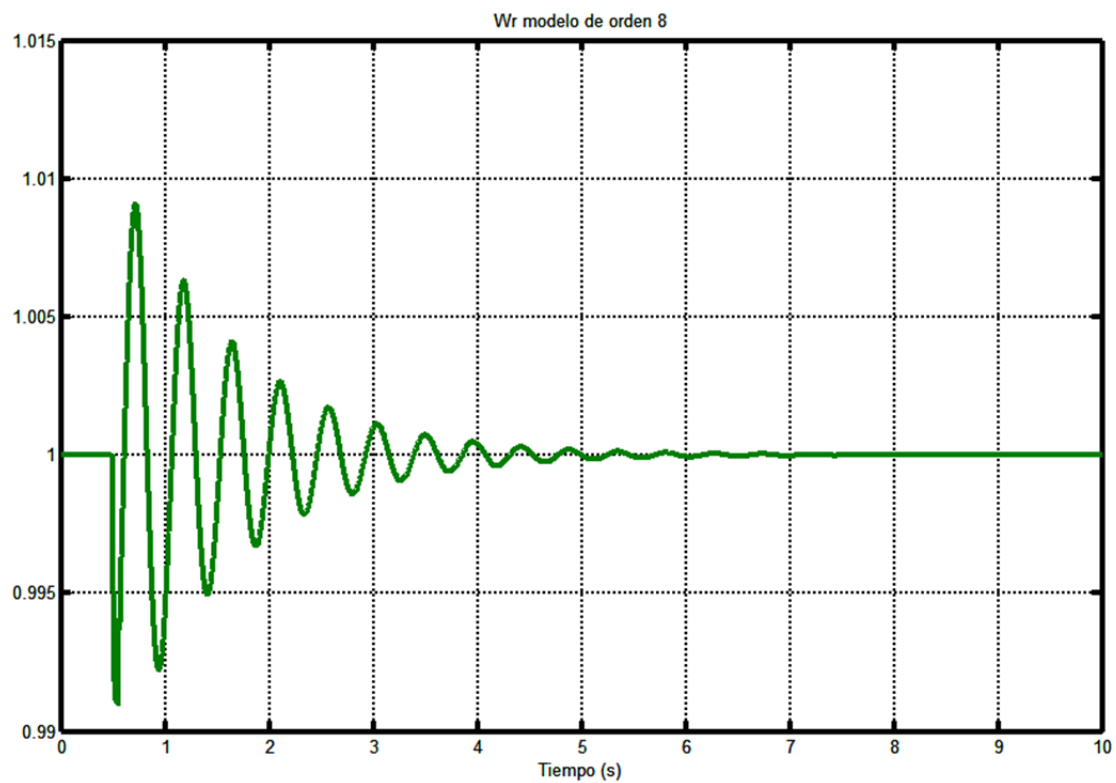


Figura 5.39: Velocidad angular sin regulador

Se observa en este modelo que aunque los picos sean mucho más altos que en los modelos anteriores la estabilización es mucho más rápida porque tenemos muchas más variables de estado que ayudan a la recuperación de la señal en régimen permanente.

Como se observa en la tabla 5.13 el tiempo de cortocircuito es considerablemente mayor que en los modelos anteriores porque aunque, como pasaba en los casos anteriores sean unos parámetros los que limitan ese límite de estabilidad, existen otros muchos que permiten que este tiempo aumente con facilidad.

- **Hueco de tensión 0.5sg.** Este tiempo es el máximo valor que puede soportar el generador para que el sistema sea estable y su valor final se aproxime al valor en régimen permanente.

	Valor Nominal	Valor más desfavorable (en el cortocircuito)	Valor más desfavorable (corto restablecido)	Valor final	Tiempo aproximado de estabilización(sg)
Intensidad(I_{SD})	0,4172	10,8429	7,9545	1,4173	2,5
delta(δ)	14,7321		145,41	14,7397	4,5
Potencia Activa(P)	0,88	0	4,786	0,8805	4
Par(T_e)	0,9108	7,7063	7,0311	0,9113	4,5
Velocidad angular(W_r)	1	1,039	0,9825	1	5

Tabla 5.14: Resultados modelo Orden 8 (corto de duración 0.5sg.)

En este modelo no se ha utilizado regulador de velocidad porque no es necesario al regularse automáticamente por sí solo. Las variables que reguladas por este modelo son:

- Delta, w_r , e_q' , e_d' , ψ''_d , ψ''_q , ψ_d , ψ_q

En las figuras 5.40 y 5.41 se observa muy bien la diferencia de los modelos estudiados. En la primera se representa un valor muy característico de la estabilidad del generador síncrono como es el ángulo de carga y en la segunda se representa el par electromecánico.

Leyenda:

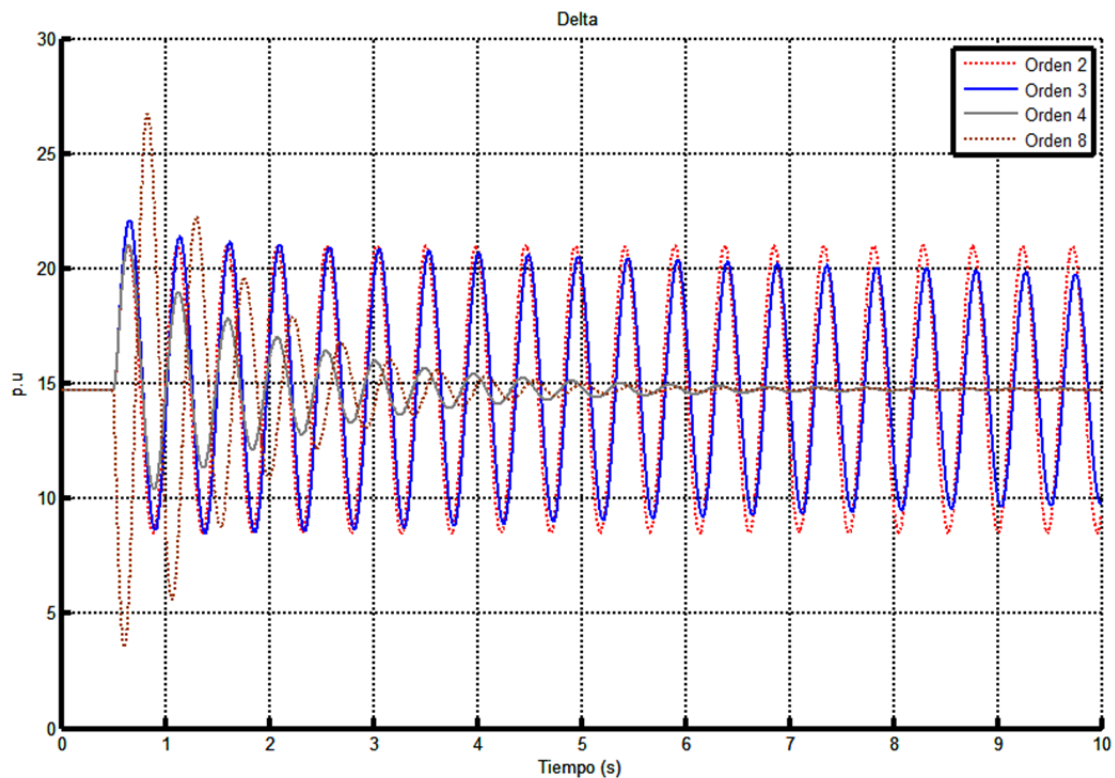


Figura 5.40: Ángulo de desfase

En la figura 5.40 se observa que el modelo de segundo orden no consigue estabilizar, oscilando todo el tiempo después del cortocircuito, mientras que el modelo de orden tres logra reducir algo su oscilación, consiguiendo estabilizarse en un largo tiempo.

En cambio los modelos de orden cuatro y ocho son muy semejantes y consiguen estabilizarse totalmente en un periodo de tiempo bastante bajo.

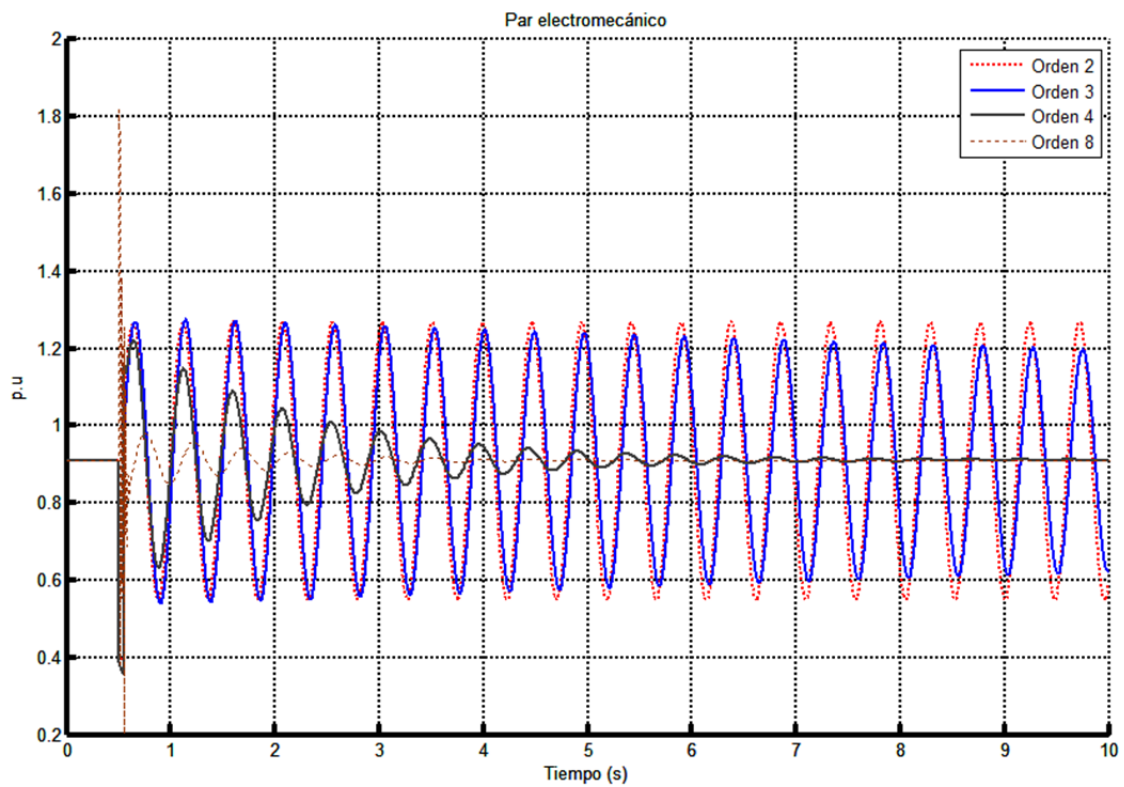


Figura 5.41: Par electromecánico

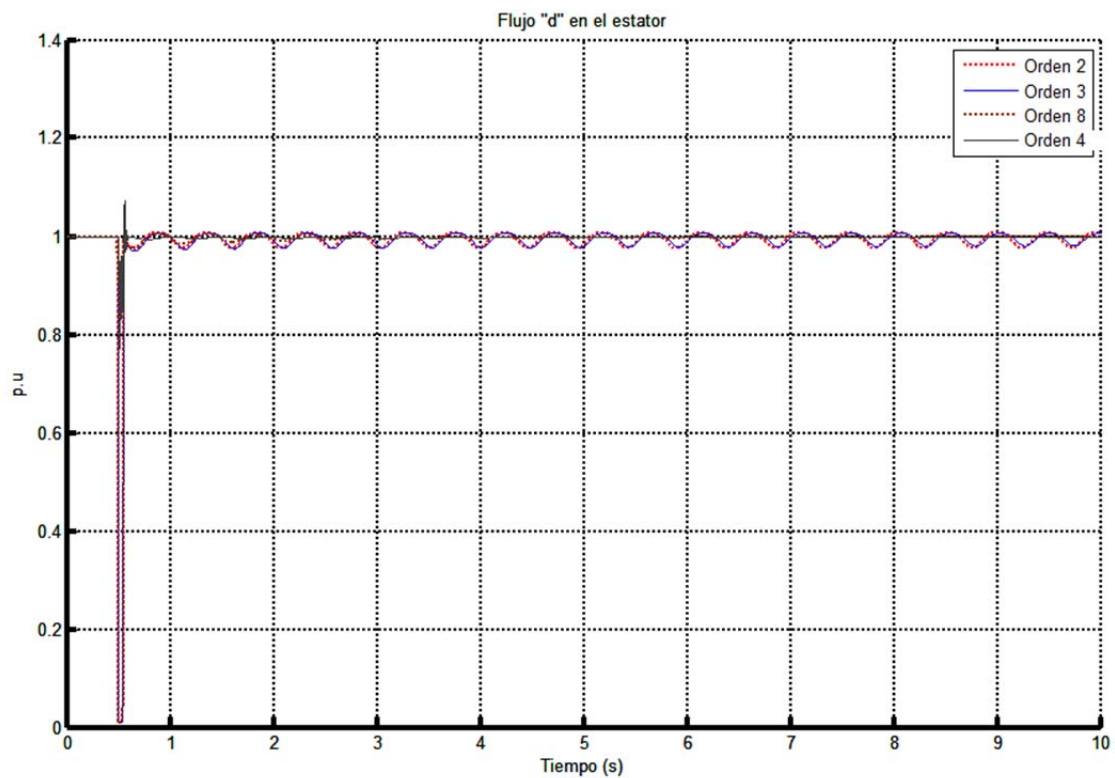


Figura 5.42: Flujo d

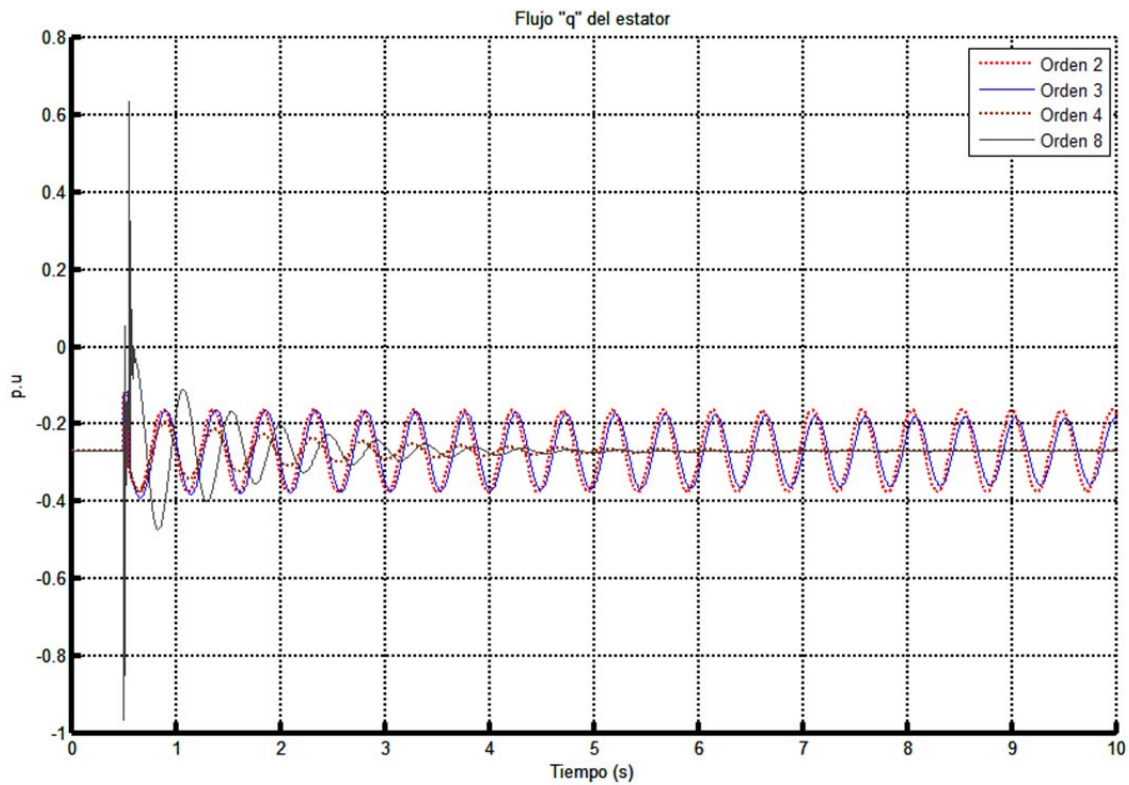


Figura 5.43: Flujo q

En la gráfica 5.41 ocurre algo muy parecido que en el ángulo de carga. Existe una clara semejanza entre el modelo de orden 2 y 3; al igual que entre los modelos 4 y 8, aunque en este último existan en el cortocircuito unos picos mayores que en el modelo de orden 4. En los flujos d y q , figuras 5.42 y 5.43 se observa también unos pico muy grandes del modelo de orden 8 en el tiempo del cortocircuito y una vez recuperado este la tendencia de todos los modelos es similar a las anteriores.

Cabe destacar que en todos los estudios, el pico mayor cuando ocurre el cortocircuito, se aprecia en el modelo de orden 8 y esto es debido a que tiene muchas más dinámicas que los demás modelos y hace que el pico de todas las variables se visualice perfectamente. Esto es muy útil para el cálculo de las intensidades pico que tiene el generador frente a cortocircuitos.

En las tablas donde nos encontramos ☐ quiere decir que la derivada de su valor es distinta a 0 en todo su tiempo de medición, por lo tanto no existe un valor máximo ni mínimo en todo su espacio de tiempo.



CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

Y FUTUROS ESTUDIOS

CONCLUSIONES

En este proyecto se ha estudiado la dinámica de la máquina síncrona para su incorporación a la red. Como se ha mostrado en esta tesis para realizar un estudio rápido y eficaz, valdría con utilizar el modelo de orden 4 al ser los resultados muy parecidos al del modelo que incorpora todas las dinámicas del generador de mayor orden. El modelo clásico y de un eje vale para introducirse un poco en la materia pero nunca para realizar una prueba formal. El modelo de orden 3 con regulador puede ser aceptable al igual que el modelo 4.

Si se quisiera encontrar todas las magnitudes nominales de las protecciones del generador síncrono se debe de hacer un estudio con el máximo orden para obtener todos los picos de las intensidades y conseguir una protección para nuestra máquina óptima.

FUTUROS ESTUDIOS

Como futuros estudios a partir de este trabajo fin de grado cabe destacar la vectorización en Matlab de la máquina síncrona con el fin de poder introducir en el sistema eléctrico varias máquinas a la vez. El objetivo de esta vectorización es poder realizar una prueba de una pasada y obtener los resultados de las máquinas que interesen, sin tener que hacer en Matlab una prueba por cada máquina a utilizar. Este estudio se podrá realizar en cualquiera de los modelos estudiados pero lo más lógico es hacerlo en el modelo de orden 8 con el fin de que el estudio sea lo más completo posible.

Con la realización de la vectorización en el modelo de mayor orden se pueden sacar las variables que desees, ya que este modelo tiene todas las dinámicas de la máquina síncrona y además poder verlas de tantos generadores síncronos que se desee. La visualización además de práctica, sería simple, porque los resultados se expresarían en una matriz en la cual aparecería todos los datos de todos los generadores y de todas dinámicas relacionados mediante un número de fila y de columna.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill
- [2] F. Milano, *Power System Modelling and Scripting*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [3] Peter W. Sauer y M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall
- [4] *Análisis moderno de sistemas de potencia, Ing. eléctrica para ingenieros de ejecución*, www.inele.ufro.cl
- [5] Jhon J. Grainger y William D. Stevenson Jr., *Análisis de sistemas de potencia*, McGraw-Hill
- [6] Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria. *Máquinas síncronas: Potencia activa y reactiva. Estabilidad estática*. www.unican.es/index.html
- [7] http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/electronica/N10_2002/5_estabilidad.pdf
- [8] Pablo Javier Verdugo Rivadeneira. Escuela Politécnica Superior. *Metodología de sintonización de parámetros del estabilizador del sistema de potencia*
- [9] Jesús Fraile Mora, *Máquinas eléctricas*, Mc Graw Hill
- [10] Gómez Espósito, Antonio, *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*, Mc Graw Hill



Anexo 1

Datos modelos en Matlab

```
base = [100;50];           %[Sb,Hzb]

%Cálculos iniciales
j=sqrt(-1);
ug=1;
Sg=((0.88*555)/100)+j*((0.2*555)/100);

%CONDICIONES INICIALES
mtx(1,1)= real(Sg)*base(1);      % Pg (MW)
mtx(1,2)= imag(Sg)*base(1);      % Qg (MVar)
mtx(1,3)= abs(ug);               % abs (V) pu
mtx(1,4)= angle(ug);             % angle (V) rad_electric

%DATOS DE LA MAQUINA SINCRONA
data_SG(1,1)= 2*pi*50;           % w
data_SG(1,2)= 3;                 % H
data_SG(1,3)= 0.0378;            % Rs (pu)
data_SG(1,4)= 0.006;             % Rfd (pu)
data_SG(1,5)= 0.0643;            % Rld (pu)
data_SG(1,6)= 0.0643;            % Rlq (pu)
data_SG(1,7)= 0.487;             % Lmd (pu)
data_SG(1,8)= 0.2375;            % Lmq (pu)
data_SG(1,9)= 0.587;             % Ld (pu)
data_SG(1,10)= 0.3375;           % Lq (pu)
data_SG(1,11)= 0.1;              % Lds (pu)
data_SG(1,12)= 0.5321;           % Lfd (pu)
data_SG(1,13)= 0.5214;           % Lld (pu)
data_SG(1,14)= 0.3456;           % Llq (pu)
data_SG(1,15)= 555;              % MVA base

[mtx,SG.dx0,SG.x0,SG.yi,SG.yo,SG.p,INVM]= SG_ini(mtx,data_SG,base);

alpha=0.0;
Uabc=[1;1;1]; Fabc=[0;-2*pi/3;+2*pi/3]+alpha;

INVM=INVM;
```



Ecuaciones modelos en Matlab

```
function[mtx,dx0,x0,yi,yo,p,INVM]=SG_ini(mtx,data,base)
% Condiciones iniciales generador sincrónico
% Valores en pu
% Definición de la matriz MTX
% (1) mtx(1,1)= Pg (MW)
% (2) mtx(1,2)= Qg (MVar)
% (3) mtx(1,3)= V (pu)
% (4) mtx(1,4)= angle (rad)
% (5) mtx(1,5)= Tm (pu)
% (6) mtx(1,6)= Wr (pu)
% (7) mtx(1,7)= Pdc (pu)
% (8) mtx(1,8)= Vdc (pu)
% Definición de las variables de estado
% (1) x0(1,1)= di (ángulo de carga en rad.)
% (2) x0(1,2)= Wr (pu)
% (3) x0(1,3)= e'q (pu)
% Definición de las variables de entrada
% (1) yi(1,1)= abs(ug) (pu)
% (2) yi(1,2)= angle(ug) (ángulo en rad)
% (3) yi(1,3)= Wgrid (pu)
% (4) yi(1,4)= Efd (pu)
% (5) yi(1,5)= Tm (pu)
% Definición de las variables de salida
% (1) yo(1,1)= ig (pu) e'q*Ys (Ys=1/(rs+jx'd))
% (2) yo(1,2)= Wr (pu)
% (3) yo(1,3)= Pg (pu)
% (4) yo(1,4)= Qg (pu)
% Definición de las variables de salida(2)
% (1) p(1,1)= j (componente imaginario)
% (2) p(1,2)= Ys (admitancia) (1/Zs)
% (3) p(1,3)= H (s)
% (4) p(1,4)= W0 (pu)
% (5) p(1,5)= Sb1/Sb2 (pu) (MVA_SG/MVA_SIST)
j=sqrt(-1);
alpha=0.0;
% p.w=2*pi*50;
% p.H=3;
% p.Rs=0.0378;
% p.Rfd=0.006;
% p.Rld=0.0643;
% p.Rlq=0.0643;
% p.Lmd=0.4870;
% p.Lmq=0.2375;
% p.Ld=0.5870;
% p.Lq=0.3375;
% p.Lds=0.1;
% p.Lfd=0.5321;
% p.Lld=0.5214;
% p.Llq=0.3456

% Parámetros del generador síncrono
Sb_SG = data(1,15);
Sb_sist=base(1);
w = data(1,1);
H= data(1,2);
Rs = data(1,3);
Rfd = data(1,4);
```




```
Rld = data(1,5);
Rlq = data(1,6);
Lmd = data(1,7);
Lmq = data(1,8);
Ld = data(1,9);
Lq = data(1,10);
Lds = data(1,11);
Lfd = data(1,12);
Lld = data(1,13);
Llq = data(1,14);

% Cálculo de los parámetros restantes necesarios
Ll = Ld- Lmd;
Ldd = Ll+( Lmd* Lfd)/( Lmd+ Lfd);
Td0 = ( Lmd+ Lfd)/ Rfd;

% Cálculo de las condiciones iniciales
Sg = (mtx(1,1)+j*mtx(1,2))/Sb_SG;
ug = mtx(1,3)*exp(j*mtx(1,4));
ig_abs = sqrt(real(Sg)^2+imag(Sg)^2)/mtx(1,3);
phi = acos((real(Sg))/(mtx(1,3)*ig_abs));
phi_grados = phi*(180/pi);
ug_abs = mtx(1,3);

% Cálculo del ángulo de carga
di = atan(( Lq*ig_abs*cos(phi)- Rs*ig_abs*sin(phi))/(ug_abs+
Rs*ig_abs*cos(phi)+ Lq*ig_abs*sin(phi)));
di_grados = di*(180/pi);

% Cálculo de los vectores espaciales en un marco de referencia dq
% girando a sincronismo de la máquina síncrona. Variables estados
ud = ug_abs*sin(di);
uq = ug_abs*cos(di);
u = ud+j*uq;
id = ig_abs*sin(di+phi);
iq = ig_abs*cos(di+phi);
i=id+j*iq;
f_d = uq+ Rs*iq; % flujo en el estator eje d
f_q = -ud- Rs*id; % flujo en el estator eje q

% Cálculo de los vectores espaciales en un marco de referencia dq
% Variable rotor
w0=2*pi*base(2);
ifd = (uq+ Rs*iq+ Ld*id)/ Lmd;
ufd = ifd* Rfd;
Te = f_d*iq-f_q*id;
Tm = Te;
Efd = ( Lmd/ Rfd)*ufd;
EI= Lmd*ifd;
eq_prima = EI-( Ld- Ldd)*id; % variable de estado e'q
wr=1;

% Cálculo de is a partir de xdd y Xq
M=[Ldd Rs;Rs -Lq];
INVM=inv(M);
is_s=INVM*[-uq + eq_prima ; -ud];
```



```
%Comprobación de la e a partir de la tensión de salida u y la  
corriente i  
ee=u+( Rs+j* Ldd)*i;  
ed_prima =ud+ Rs*id- Ldd*iq;  
e=ed_prima+j*eq_prima;  
d_eq_prima=(1/ Td0)*(Efd-EI);  
d_wr=(Tm-Te)/(2* H);  
d_di=1-1;  
  
%Actualización de la matriz mtx  
mtx(1,1:4)=mtx(1,1:4);  
mtx(1,5)=Tm;           %Tm  
mtx(1,6)=wr;           %wr  
mtx(1,7)=0;            %Pdc  
mtx(1,8)=0;            %Vdc  
  
% Determinación de las variables de estados (x0) (dx0)  
dx0(1,1)=d_di;  
dx0(1,2)=d_wr;  
dx0(1,3)=d_eq_prima;  
  
x0(1,1)=di;    %variable de estado del ángulo de carga "delta"  
x0(1,2)=1;    %variable de estado de la velocidad de la máquina  
x0(1,3)=eq_prima;  
x0(1,4)=di+alpha-pi/2;    % theta0  
  
%Determinación de las variables de entrada (yi)  
yi(1,1)= abs(u);    % modulo u (p.u)  
yi(1,2)= angle(u);    %(ángulo de carga en rad.)  
yi(1,3)= wr;        %(pu)  
yi(1,4)= Efd;        %(pu)  
yi(1,5)= Tm;        %(pu)  
  
%Determinación de las variables de salida (yo)  
yo(1,1)= 0;          %(pu)      ig=e´q*Ys (Ys=1/(rs+jx´d))  
yo(1,2)= wr;          %(pu)  
yo(1,3)= real(Sg);    % Pg (pu)  
yo(1,4)= imag(Sg);    % Qg(pu)  
  
% Parámetros de la máquina  
p(1,1)= w;  
p(1,2)= H;  
p(1,3)= Rs;  
p(1,4)= Rfd;  
p(1,5)= Rld;  
p(1,6)= Rlq;  
p(1,7)= Lmd;  
p(1,8)= Lmq;  
p(1,9)= Ld;  
p(1,10)= Lq;  
p(1,11)= Lds;  
p(1,12)= Lfd;  
p(1,13)= Lld;  
p(1,14)= Llq;  
p(1,15)= Ll;  
p(1,16)= Ldd;  
p(1,17)= Td0;  
p(1,18)=ed_prima;
```

Anexo2

Cajas en Matlab/Simulink comunes a los 3 modelos

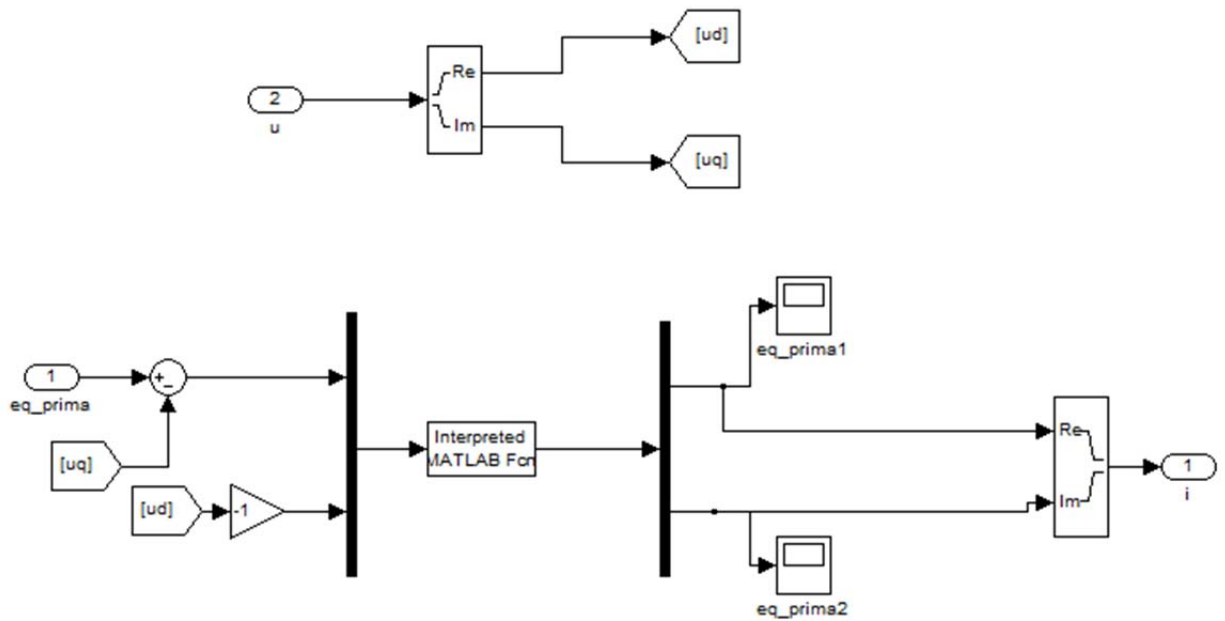


Figura A.1: Cálculo de la intensidad

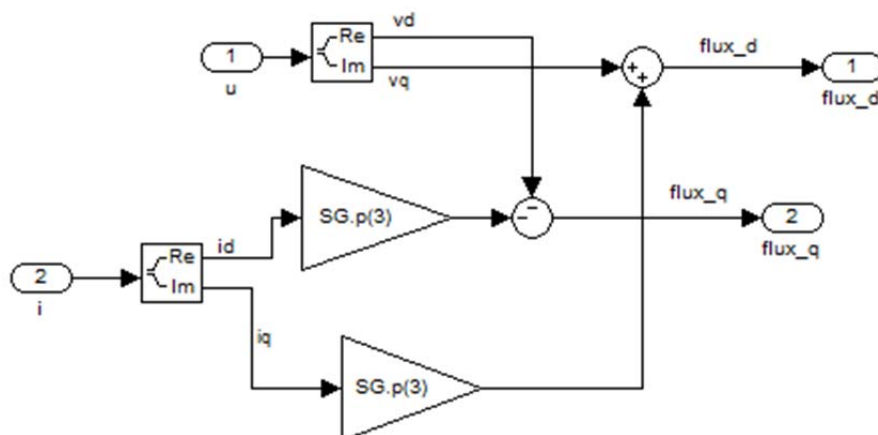


Figura A.2: Cálculo de los flujos

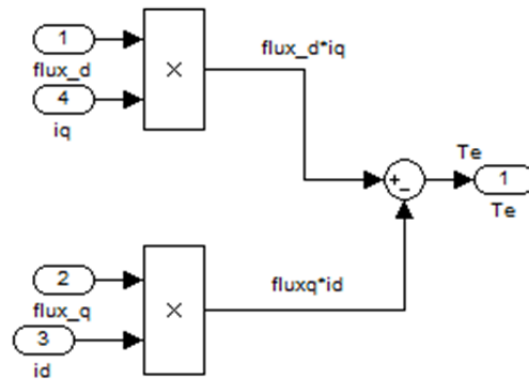


Figura A.3: Cálculo del par

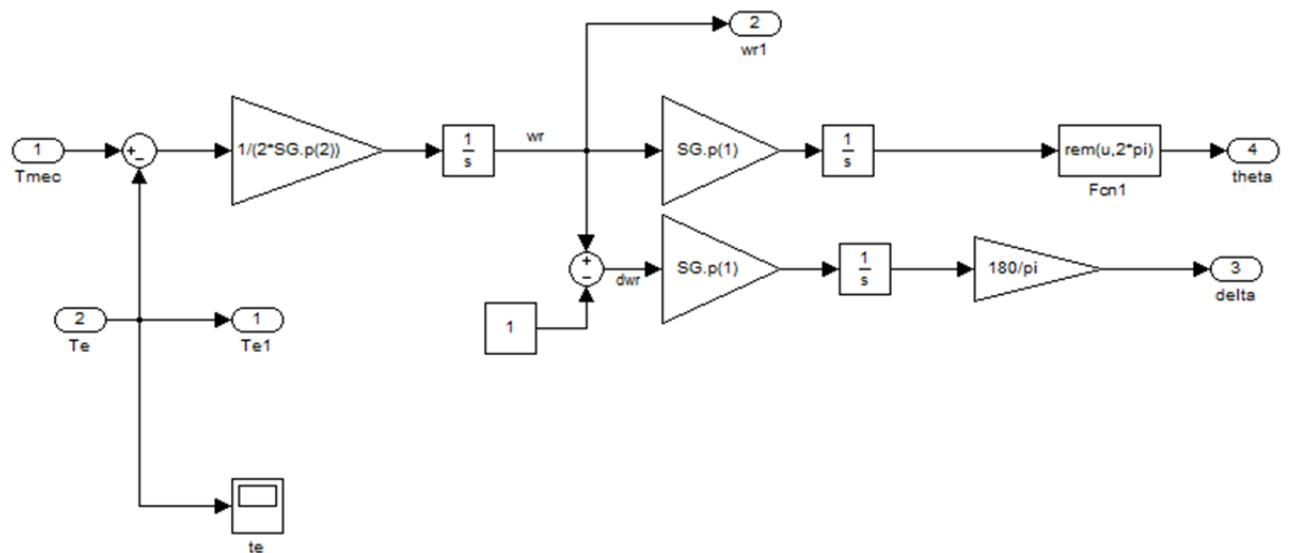


Figura A.4: Cálculo de los ángulos Theta y Delta

Cajas en Matlab Simulink comunes a los modelos de Orden 3 y 4

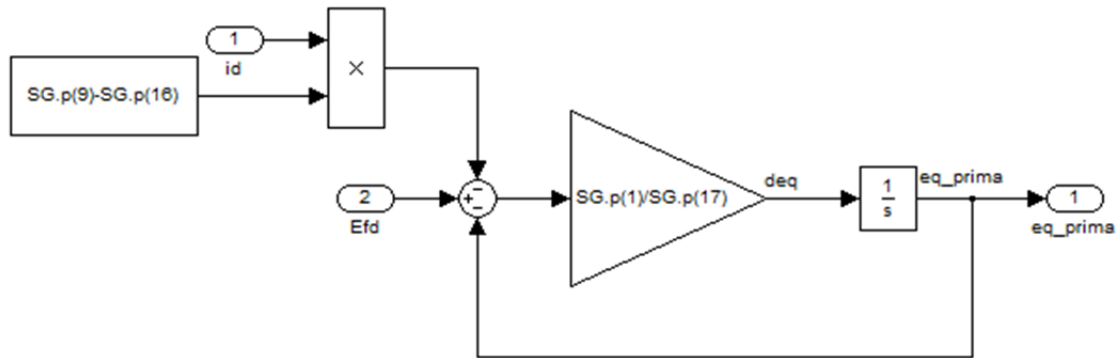


Figura A.5: Cálculo de la tensión en bornes del generador "eq''

Cajas en Matlab/Simulink modelo de Orden 4

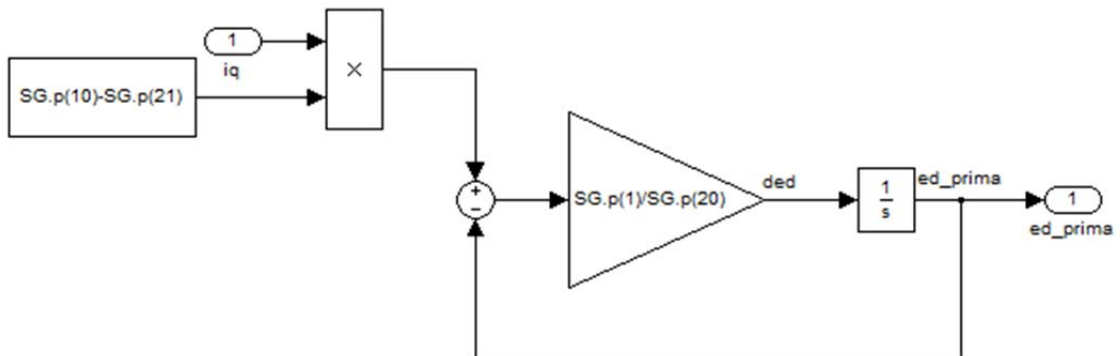


Figura A.6: Cálculo de la tensión en bornes del generador "ed''

ANEXO 3: Modelo general de la máquina síncrona

